

引用格式:张贺,王绍强,王梁,等.自然资源要素综合观测指标体系探讨[J].资源科学,2020,42(10):1883-1899.[Zhang H, Wang S Q, Wang L, et al. Discussion on the indicator system of comprehensive observation of natural resource elements[J]. Resources Science, 2020, 42(10): 1883-1899.] DOI: 10.18402/resci.2020.10.06

自然资源要素综合观测指标体系探讨

张贺¹,王绍强^{2,3},王梁⁴,程书波⁵,姜正龙¹,张子凡³

(1. 中国地质大学(北京)海洋学院,北京100083;2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统观测与模拟重点实验室,北京100101;3. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,武汉430074;4. 中国地质调查局地球物理调查中心,廊坊065000;5. 河南理工大学应急管理学院,焦作454000)

摘要:为了实现自然资源的规范管理和高效利用,需要对其要素进行长期、连续、稳定的综合观测,从而获得相关的基础数据,掌握资源种类、数量、质量和资源间相互作用过程信息。由于目前中国没有形成统一的自然资源观测指标体系,导致不同区域间资源观测和管理存在差异,使得国家尺度上对自然资源的规范化管理和合理利用难以实现。因此,亟需构建一套适用于国家尺度、科学、系统、规范的自然资源要素综合观测指标体系。本文以解决认识自然生态变化规律、预判发展趋势的基础数据支撑能力不足问题为出发点,参考国内外现有观测(监测)指标体系,确立了自然资源要素综合观测指标体系建立和选取的基本原则;在自然资源要素分类的基础上,采用正、反演相结合、模块化等构建方法,建立了由36个归类模块、6个资源要素综合观测系统和若干个赋能模块构成的自然资源要素综合观测指标体系。通过建立大气-地表-地下多层次,个体-景观-区域多尺度的立体化综合观测网,获取自然资源要素数据,以期实现对自然资源的精细化管理、评价和利用。

关键词:综合观测;自然资源;指标体系;要素;观测方法

DOI:10.18402/resci.2020.10.06

1 引言

按照《党的十八届三中全会重要决定辅导读本》《自然资源统一确权登记办法(试行)》和《自然资源调查监测体系构建总体方案》中相关内容,自然资源是指天然存在、有使用价值、可提高人类当前和未来福祉的自然环境因素的总和,包括水、森林、山岭、草原、荒地、滩涂和探明储量的矿产七大类。自然资源是社会经济发展的物质基础,也是衡量一个国家实力的重要组成部分^[1,2]。规范化管理、合理利用、有效保护自然资源是人类面临的长期任务,也是各国政府工作中极为重要的一项内容^[3]。准确、科学的自然资源数据是自然资源科学管理、决策的重要基础,调查、监测和观测是获取自然资

源数据的重要手段。

中国现有的自然资源调查、监测主要是摸清自然资源数量和种类,掌握自然资源质量和变化情况,对各类自然资源数量、质量变化动因机制、演化趋势和资源间耦合作用关系等方面的观测研究尚需完善^[4,5];加之现有监测、观测工作分属于不同部门、单位管理,标准不一、数据共享不畅^[6],这些已经成为中国自然资源统一管理的瓶颈和亟待解决的问题。

以自然资源部对自然资源实行“两统一”管理(统一行使全民所有自然资源资产所有者职责,统一行使所有国土空间用途管制和生态保护修复职责)为指导,依据山水林田湖草生命共同体理念^[7],

收稿日期:2020-06-15,修订日期:2020-09-24

基金项目:全国自然资源要素综合观测体系规划与部署项目(DD20208063);自然资源要素综合观测数据集成与应用服务项目(DD20208067)。

作者简介:张贺,女,河南南阳人,博士生,研究方向为自然资源学、海洋科学和含油气盆地分析。E-mail: zhanghe9306@163.com

通讯作者:王绍强,男,湖北襄樊人,研究员,研究方向为生态系统生态学、全球变化生态学、生态学模型、生态遥感。E-mail: sqwang@igsrr.ac.cn

通过开展自然资源要素综合观测,统一观测方法,统一观测指标,统一技术要求,进行长期、连续、稳定的观测,获取并积累观测数据,研究自然资源数量、质量变化动因机制和资源间耦合作用过程,揭示自然资源变化规律和演化趋势,预测预警自然资源未来状态和资源安全问题,高效服务国土空间规划、资源环境承载力评价、“三区三线”精准划定和山水林田湖草统一保护、统一修复等工程^[8-10],保障自然资源永续发展,以期实现人与自然和谐共生,为自然资源部履行“两统一”管理职责和国家生态文明建设有序推进提供科技支撑。

2 相关指标体系研究现状

习近平总书记在十八届中央政治局第四十一次集体学习时强调,生态环境问题归根到底是资源过度开发、粗放利用、奢侈消费造成的。20世纪以来,随着地球自然资源的过度开发利用,环境污染、生态破坏等问题呈现出全球化特征。目前,许多国家和地区根据各自区域的资源生态环境问题,相继开展了相关观测指标体系的研究^[11-14]。

2.1 国外相关观测指标体系

一些发达国家和国际组织在全球和国家尺度上构建了各种类型的指标框架与体系开展观测工作(表1)。例如1894年世界冰川监测服务中心(WGMS)开始了冰川观测网(GTN-G),针对冰川资源面积、形状和运动速度、冰厚度、雪线等指标进行观测,主要掌握冰川资源数量平衡状况和冰川水资源供给量变化等;1996年由政府间海洋委员会(IOC)执委会提出建立的全球海洋观测系统

(GOOS),主要建立了以海洋资源、气候资源为主的观测指标,包括浅海(大气、海通量、浮游生物等)和深海观测指标(海洋表面温度、营养物等),服务海洋资源、海岸带管理和气候预测研究等;2000年美国国家基金会启动了国家生态观测站网(NEON),主要任务是分析环境变化的原因、后果和对环境变化趋势作出预判,重点关注生物资源和气候变化等问题^[15]。

2.2 国内相关观测指标体系

改革开放以来,中国针对不同类型的观测(监测)网络,构建了不同作用的观测(监测)指标体系^[16,17]。这些观测网络根据观测(监测)目的和功能分为综合研究网、专项研究网和专业监测网(表2)。

(1)综合研究网:是指由多个观测站联合组成的系统网络,构建的观测指标体系服务于综合研究内容。如中国科学院1988年开始建立的中国生态系统研究网络(CERN),包括陆地生态系统和水域生态系统两方面。选取的观测指标主要以生态指标为主,服务于评价生态系统结构、功能等状况,反映生态系统的健康程度。CERN在2018年研究修订了农田、森林、草原、荒漠、沼泽生态系统长期观测指标体系,重点考虑了国家生态环境方面和国际普遍关注的微生物方面的热点问题;针对新形势下观测仪器趋于小型化和轻便化的发展趋势,加强了对仪器观测方法的修订^[18,19]。

(2)专项研究网:针对某一种资源或某一项具体研究内容进行观测,主要依托重大科学问题或研究课题建站,观测指标体系构建也是如此。如中国

表1 国外自然资源观测指标体系

Table 1 International indicator systems of natural resources observation

国家/组织	建立年份	观测网/观测系统名称	观测指标
世界冰川观测服务(WGMS)	1894	全球陆地冰川观测网(GTN-G)	冰川面积、形状、冰厚度、运动速度等
世界气象组织、日本等	1992	全球气候观测系统(GCOS)	臭氧量、气温、降水量、光照时间、风力等
政府间海洋学委员会(IOC)、世界气象组织、国际科学联合会理事会和联合国环境规划署	1996	全球海洋观测系统(GOOS)	海洋表面温度、海平面高度、降水量、海水密度等
联合国、欧盟和美国环境规划署	2002	全球综合地球观测系统(GEOSS)	空气质量6参数、水量水质、生物多样性等
美国	1980	美国长期生态研究网络(LTER)	植物茎流、叶片温度、土壤水分、光辐射等
英国	1990	英国环境变化监测网络(ECN)	地表径流量、浮游动植物种类及丰富度等
美国国家科学基金	1993	国际长期生态观测研究网络(ILTER)	植被类型、地表水和土壤酸碱度等
美国	2000	美国国家生态观测站网(NEON)	O ₃ 浓度、外来入侵物种、河流中含氮量等

表2 国内相关观测(监测)指标体系

Table 2 Chinese indicator systems of ecosystem observation (monitoring)

分类	观测网名称	所属单位	观测指标
综合研究网	中国生态系统研究网络(CERN)	中国科学院	植被营养元素、生物多样性指数、密度等
	黑河流域地表过程综合观测网	北京师范大学、中国科学院	植被蒸腾量、土壤蒸发量、地表温度等
专项研究网	中国陆地生态系统定位观测研究(CTERN)	国家林业局	群落物种结构、表层土壤速效养分等
	中国森林生态系统定位研究网络(CFERN)	国家林业局	群落高度、演替阶段或林龄、凋落物元素含量、大型真菌种类和数量等
	中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)	中国科学院	碳通量、水热通量、温室气体排放量等
专业监测网	环境监测网	生态环境部	CO ₂ 、O ₃ 、颗粒物、土质、水质等
	气象监测网络	气象部门	降水强度、空气质量等
	水文监测站网	中国地质调查局和环境监测院	地表水径流量、水质、地下水位等

陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX),以土壤、植被、大气等资源 and 生态系统碳循环为主要观测要素,揭示不同生态系统冠层-大气、土壤-大气和根系-大气界面碳、氮、水通量计量平衡关系及其时间变异的生物控制机制和地理空间格局^[20,21]。

(3)专项监测网:主要依据部门业务需求建站,以监测、管理为主,科研为辅,监测指标体系主要服务相关业务方面的监测预警。如2015年国家提出建设生态环境监测网络,监测对象主要以大气、地表水、土壤、生物等资源为主^[22],对中国资源、生态、环境质量状况等进行实时监测。

2.3 自然资源要素综合观测与现有生态系统要素观测对比分析

自然资源要素综合观测和现有生态系统要素观测既有关联,又有区别。观测要素既有重合,又各有特色和针对性。两种观测都是通过布设合理的观测站网,设定观测指标获取并积累观测数据,服务特定观测目的;区别主要体现在空间单元划分方案、观测目标、具体指标和服务对象等方面(表3)。

综上所述,中国现有相关观测(监测)指标体系已有效服务于各类观测网络,获得了大量重要基础数据,为解决许多生态环境问题,促进人类对各类生态系统产生更深刻的认识发挥了重要作用。但是自然资源要素综合观测与生态系统要素观测仍存在明显区别,现有相关观测(监测)指标体系主要以生态观测指标为主,无法满足国家尺度上对于自然资源管理的需求,目前尚缺乏自然资源综合观测的指标体系。因此,在原有各类观测指标体系基础之上,构建一套适用于中国国家尺度,符合自然资源分布规律,满足自然资源统一管理,反映自然资源整体性、系统性以及资源间耦合作用过程,方便统一实施的标准化自然资源要素综合观测指标体系,便成为当前迫切需要研究解决的问题。

3 指标体系构建原则与方法

自然资源要素综合观测网络的构建以服务国家生态文明建设,支撑自然资源综合管理,探索各类资源的变化动因机制、演化趋势和相互间耦合作用过程,解决自然资源重大科学问题为目标。通过

表3 自然资源要素综合观测与现有生态系统观测对比表

Table 3 Comparison between comprehensive observation for natural resource elements and existing ecosystem observations

观测类型	自然资源要素综合观测	生态系统要素观测
观测对象	自然资源(土地、森林、草原、水、湿地、海域海岛等资源)	生态系统(森林、草地、荒漠、水域、城市等生态系统)
空间单元	自然资源区划	生态功能区划
观测目标	服务自然资源管理,掌握自然资源数量、质量变化动因机制和资源间耦合作用过程等	以科研为主,掌握生态系统结构、功能及动态变化规律等
具体指标	年耕地播种总面积、森林蓄积量、牧草产量、地下水位、冰川冰储量等	林冠结构、植被密度、植被营养元素、微生物量、地下水位等
服务对象	以政府管理部门为主	以科研院所研究为主

采用卫星遥感、雷达、无人机、野外实地观测等多种获取数据的技术方法,对气候、地表水、林、草、土地和冰川等多种自然资源进行全方位、长期、连续的观测研究,形成全面、系统、科学的立体综合观测体系,为构建生态文明社会,实现高质量发展,建设人与自然和谐共生的美丽中国,提供有效的自然资源数据保障。

3.1 综合观测特点及拟解决主要问题

3.1.1 综合观测特点

由于自然资源要素具有种类多、范围广的特点,涉及自然界多个圈层的各类自然资源,并在多层次空间不均衡分布;同时,各类自然资源具有关联性、整体性、动态性,随时间、空间和外部环境不断发生变化。基于自然资源上述特征,需要建立具有多要素、全方位、全周期、整体性、动态化特点的自然资源要素综合观测网络,形成天空地海协同作业的自然资源全方位、一体化、集成化观测能力^[23],为自然资源可持续发展提供科学指导。

3.1.2 拟解决主要问题

通过构建系统的自然资源要素综合观测指标体系,获取准确科学的自然资源数据,全面掌握自然资源种类、数量、质量及其变化趋势;科学分析多个要素之间的耦合机理,充分理解不同自然资源之间相互依存、相互影响、相互转化和相互发展的关系,建立系统的多要素、多维度、多层次、多时限、动态化复杂耦合关系生命共同体体系。同时,充分利用海量结构化的观测数据,发展自然资源大数据技术,挖掘和预测自然资源时空演变规律与发展趋势,从而为高效利用自然资源 and 促进可持续发展提供长期指导,为国家宏观决策提供量化科学依据。

3.2 指标体系构建和选取的原则

指标体系的设计应遵循一定的构建原则,确保能够科学、客观、合理、全面的反映自然资源数量、质量和耦合作用过程信息,有效服务自然资源综合观测网的建设。在学习借鉴国内外相关长期、立体观测指标体系构建经验^[14]和遵循科学性、代表性、层次性等基本原则基础上^[24-27],针对自然资源要素综合观测网络的特点和拟解决的主要问题,归纳、总结出以下6项指标体系构建和选取原则:

(1)主导因素原则。自然资源为人类的经济发

展提供了基础的物质支持和能量保障,作为推动社会进步最重要的生产要素之一,其占有和配置直接影响着一个地区的经济社会发展格局。因此指标体系的构建应统筹考虑自然资源在各个领域发挥的主导性作用,优化地区配置和综合利用。

(2)整体性原则。基于山水林田湖草生命共同体理论,构建的指标体系应尽可能全面涵盖各类自然资源要素,不仅能够反映单一自然资源种类、数量、质量和分布等特征,有效掌握其变化规律和发展趋势,还能够反映资源间相互影响、相互作用引起的变化。同时,确保指标体系中观测要素既有统一共性,又体现自身特性^[28-30]。

(3)系统性原则。构建的指标体系应能够充分体现从开展观测、数据获取、资源现状评价,到最终成果应用于资源管理的全流程,基本覆盖自然资源综合观测领域从规划设计、长期运行到成果应用全过程,确保各环节间的协调统一,充分反映指标体系各子系统的关联性,保证观测数据全生命周期的管理和应用。

(4)空间显性原则。构建过程中不仅要考虑观测指标的具体空间地理坐标、属性特征和功能指示,还要考虑通过指标获取的观测数据能够代表的区域范围和反映相应资源变化的格局与程度,为自然资源数量、质量变化情况的综合评价,以及预判自然资源变化程度与演化趋势提供全面、翔实的基础数据支撑。

(5)继承性原则。指标的设计应基于自然资源要素综合观测网建设需求,充分研究已有相关调查、监测、观测网络^[31,32],参考对应指标标准、规范与技术要求,借鉴其中能够有效评价资源数量、质量和属性的部分。由此构建的指标体系,能够实现与国内标准和国际通用标准接轨,有利于促进科学观测数据的有效流通和共享,推动观测数据跨学科、跨部门、跨地区、跨行业的广泛应用。

(6)可比性原则。同一层次的观测指标应具有相同的计量单位、计算方法和内涵范围,从而使得自然资源综合观测结果既能反映实际情况,又便于在不同空间位置、不同时间跨度和不同资源类型间进行比较。通过分析差异与规律,发现资源相对优势状态,反映发展变化趋势。

3.3 构建方法

根据自然资源要素综合观测指标体系建立和选取的基本原则,参考国内外已有相关指标体系,在自然资源要素分类的基础上,采用正、反演相结合、模块组合等方法,构建自然资源要素综合观测指标体系(图1)。

(1)遴选观测对象。依据《党的十八届三中全会重要决定辅导读本》中自然资源部职责涉及的适于观测的资源类型,同时,考虑到气候变化会对各类资源的种类、数量、质量、结构功能等变化影响较大,其中大气、水分等作为关键的界面要素,是资源间相互耦合作用过程的重要驱动因子,因此也将其作为观测对象。本文按照资源赋存的立体空间分布,划分为气候、地表覆盖、水和土地资源4大类,并进一步细分为15小类。其中,气候资源分为水分、光能热量、风能和大气成分资源;地表覆盖资源涵盖林木、草、作物;水资源涉及地表水、冰川、海面 and 地下水资源;土地资源包括农用地(林地、草地、耕地)和未利用地(冻土、海滩)。

(2)正、反演遴选观测指标。针对立体空间结构划分的4大类15小类自然资源逐个采用正、反演

相结合的方法对具体观测指标进行整理比对。运用正演法参考文献著作、国家标准、国内外已有相关指标体系等,寻找能够反映资源本体具有的属性特征、结构、理化性质的指标,及表征本体与客体之间相互影响及变化规律的指标。使用反演法从各类资源具有的功能角度出发反推观测指标,首先,明确各类资源的具体功能;其次,剖析用哪些方法对这些功能进行定性或定量评价,这些方法中需要用到哪些可观测参数,根据这些参数最终确定需要观测的具体指标。将通过正、反演两种方式所得到的指标进行比对,整合出能够充分反映资源数量、质量和作用过程的全部观测指标。

(3)构建层级指标模块。将正、反演遴选所得到的全部观测指标依据资源种类、数量、特征、性质和变化过程划分为三级。其中,一级指标为资源数量、资源质量和作用过程(即两种资源间通过物理、化学、生物等作用实现能量和物质交换过程),二级指标在一级指标功能基础上针对不同资源要素特征进一步细化分类,三级指标为能够表征资源状况,可用于定性或定量评价以及直接观测的指标。

在此基础上进行模块化整合,将15小类自然资

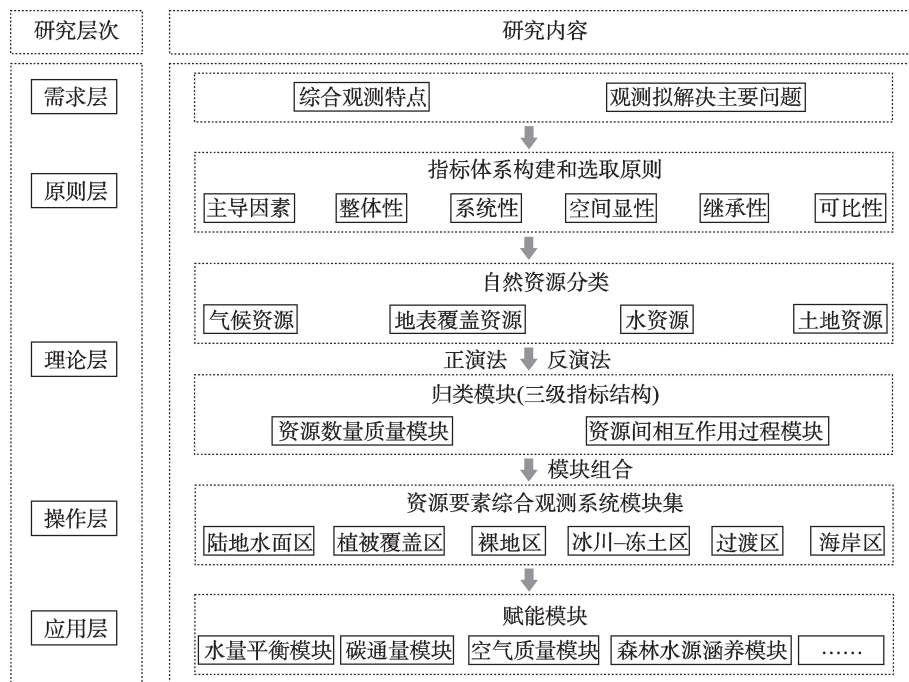


图1 指标体系构建思路图

Figure 1 A conceptual framework of the indicator system construction

源和资源间相互作用过程按“资源数量质量模块”和“资源间相互作用过程模块”进行归纳,去掉重复指标,得到若干模块,统称为指标体系的“归类模块”。此外,考虑到各类资源在不同地区存在较为明显的特征差异,可在指标使用过程中根据实际观测需求缺省无效指标或添加其他特色“归类模块”。

(4)搭建观测模块集。依据自然资源系统空间结构,将“归类模块”进行组合,建立陆地水面区、植被覆盖区、裸地区、冰川-冻土区、过渡区(湿地)、海岸区6大类资源禀赋特征和相互作用过程不同区域的模块集,服务于6大资源要素综合观测系统。

(5)形成解决问题的“赋能模块”。为有效服务于自然资源资产化管理、资源系统平衡相关科学研究和预判未来资源状态模型模拟等需求,本文从各种“归类模块”中按需抽选,建立若干“赋能模块”,即用于解决实际问题、预测自然资源时空演变规律与发展趋势的功能模块,从而为高效利用自然资源和促进可持续发展提供长期支撑。

4 指标体系结构与应用实例

自然资源要素综合观测指标体系是围绕着综合观测网的建设形成的,它是由各类自然资源要素按其内在联系形成的科学的有机整体,涉及学科领域多,影响因素复杂,这就要求在构建过程中,应综合考虑各方面因素,以自然资源学、系统学为基础,对指标体系进行清晰而全面的结构划分。本文构建的指标体系由36个归类模块(16个数量质量模块和20个相互作用过程模块)、6个资源要素综合观测系统(陆地水面区、植被覆盖区、裸地区、冰川-冻土区、过渡区、海岸区)和若干个赋能模块(水平衡模块、热量平衡模块、碳通量模块等)组成。该指标体系能够实现对自然资源种类、数量实时有效的统计计算;对资源质量准确可靠的评价分析;对资源间相互作用过程变化的实时监控预警。

4.1 归类模块

归类模块是指标体系的核心组成部分,由资源数量质量模块和作用过程模块组成(图2),是6大资源要素综合观测系统建立的基础,为赋能模块提供指标支撑。各归类模块设计的合理性、指标选取的科学性、模块间的关联性都对整个综合观测指标体系有着至关重要的影响。

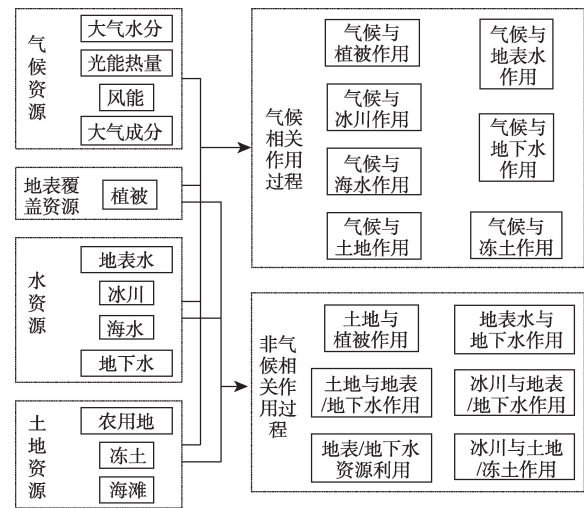


图2 自然资源综合观测指标体系“归类模块”结构图

Figure 2 Structure of the classification module of the comprehensive observation indicator system of natural resource elements

4.1.1 资源数量质量模块

资源数量质量模块共16个,气候(4个)、地表覆盖(4个)、水(4个)、土地(4个),其中29个一级指标,68个二级指标,266个三级指标(不含重复项)。该模块主要包含自然资源的种类、数量、特征和性质等方面的指标(表4)。数量方面的指标用以反映或计算某种资源的资源量;质量方面的指标用以表征资源的品质和特性。

气候资源是自然生产力的主要标志^[34,35]。气候指标是用来表示一定气候条件的单项气候要素或单项气候要素综合特征量,可用于评价某地区气候资源的丰贫状况^[36]。本文选取了云量、相对湿度、直接辐射量、瞬时风速和风能密度等指标反映气候资源数量及特征等情况,通过最小能见度、O₃、CH₄等指标反映资源质量。

地表覆盖资源广义上泛指覆盖在土壤表面的、能够直接或间接的为人类提供使用价值的资源,狭义上主要包括林木、草、作物等资源。本文依据林木、草、作物3类植被资源各自特点设计了植被数量质量共性模块和林木、草、作物数量质量特性模块,既有反映植被茂密程度的植被覆盖度、植被密度等共性指标,又有反映林分蓄积生长情况、牧草饲用价值和作物生长情况等的特性指标。

水资源类型丰富,主要包括地表水、冰川、海水、地下水等。通过水域面积、岸线周长、水深或河

2020年10月

表4 自然资源要素综合观测指标体系资源数量质量模块(部分三级指标和指标功能参考[18,19,38,39])

Table 4 Resource quantity-quality module of the comprehensive observation indicator system of natural resource elements

(Partially adapted from [18, 19, 38, 39])

资源大类	归类模块名称	一级指标	二级指标	三级指标	指标功能	观测频次	
气候资源	①大气水分数量质量模块	大气水分资源数量	云资源量	云量	反映云的数量	1次/d	
			大气水分资源量	相对湿度、铅直水汽通量、水汽通量散度	反映大气水分资源量	1次/d	
		大气水分资源质量	云层状况	云状、云高、基本反射率、组合反射率等	反映云的形态、位置及内部降水粒子尺度和密度	1次/d	
	②光能热量数量质量模块	光能热量资源数量	太阳能辐射资源量	太阳高度角、光照度、直接辐射量等	反映光能和热量资源情况,计算光亮度	实时观测	
			其他辐射量	净全辐射量、散射辐射量等	反映大气和地面辐射情况,地球热量收支状况	实时观测	
	③风能数量质量模块	风能资源数量	风资源量	风向、平均/最大/极大/瞬时风速、风能密度	反映风能资源情况,计算气候风能资源总储量	1次/h	
			气压状况	平均/最高/最低气压、空气密度等	反映大气气压情况,计算气候风能资源总储量	1次/h	
	④大气成分数量质量模块	大气成分资源质量	大气能见度	能见度、最小能见度等	反映大气环境状况	1次/h	
			空气质量	O ₃ 、CH ₄ 等	反映空气状况	1次/d	
	地表覆盖资源	⑤植被数量质量共性模块	植被资源数量	植被类别	植被类型、植被种类、优势种	反映区域内物种类型特性	1~5次/5a
				植被数量	植被面积、植被高度	计算植被覆盖率、计算蓄积量	1~5次/5a
			植被资源质量	植被质量	植被覆盖度、植被密度、植被指数	反映植被茂密程度和生长状况	1~5次/5a
生境质量				微生物种类、数量、生物量碳/氮等	反映植被提供生境情况,微生物环境及影响	1次/5a	
⑥林木数量质量特性模块		林木资源数量	林木数量	森林群落的胸高断面积	计算蓄积量	1次/5a	
			林木生长量	胸径/树高年平均生长量、净初级生产力	反映林木生长状况,计算林分蓄积生长量	1次/5a	
		林木资源质量	林木质量	郁闭度、叶面积指数、林冠结构等	反映林木利用光能状况、冠层结构、营养积累量	1次/5a	
⑦草数量质量特性模块		草资源数量	牧草数量	牧草产量	反映牧草产量	1次/a	
			牧草载畜量	载畜量、载畜压力指数、放牧面积等	反映牧草载畜能力	1次/a	
			草生产力	草面/草层最高/最低温度、出现时间等	侧面反映草的生产力	1~4次/a	
	草资源质量		草感官质量	成熟度、叶片含量、色泽、嗅觉	评定草资源品质	1~4次/a	
⑧作物数量质量特性模块	作物资源数量	作物播种收获量	播种量、产量	反映作物播种、收获情况	1次/季		
		作物数量	地上/下部总干重	反映作物生长总量	1次/季		
	作物资源质量	作物质量	籽粒品质、枝/叶/花果/皮干重等	反映作物吸收营养及利用光能状况,评定作物品质	1次/季		

续表4

资源大类	归类模块名称	一级指标	二级指标	三级指标	指标功能	观测频次	
水资源	⑨地表水数量质量模块	地表水资源数量	湖库水资源量	水域面积、岸线周长、多测点水深	计算湖库蓄水量	1次/a	
			江河水资源量	河流横截面积、流速、流向、流域面积等	计算河流径流量、河网密度、划分河流等级	1~2次/a	
		地表水资源质量	地表水理化生性质	水温、菌落总数等	反映地表水水质	1次/a	
			水情	含泥沙量、枯/平/丰水期、冰冻期等	反映河流泥沙信息,分析河水情	1次/a	
			水生生物	浮游动植物现存种类/数量/初级生产力等	反映江河湖库水质及生长动植物特征、生长状况	1次/5a	
			冰川冰储量	冰川长度、宽度、密度、面积、厚度	计算冰川冰储量	1~4次/a	
		⑩冰川数量质量模块	冰川资源数量	永久性积雪量	积雪面积、各雪层深度、雪水当量	估算积雪体积、雪水完全融化的储量	1~4次/a
				冰川资源质量	冰川水理化性质	水体电导率、浑浊度等	反映冰川水水质
			冰川及永久性积雪质量	冰川变化	冰川冰变形、冰川表面运动速度等	反映冰川自身形变、冰川运动变化情况	1~4次/a
				冰川生境	冰芯/冰川雪中微生物种类、数量	反映冰芯沉积年代气候环境变化情况,微生物环境	1次/5a
	⑪海水数量质量模块			海水资源数量	海浪资源量	波高、周期、波向、波型等	反映海岸带海况
		海流量	流速、流向		反映海洋环流情况	8次/d	
	海水资源质量	海水理化性质	海水环境噪声	噪声频带声压级、幅度谱密度等	反映海水环境噪声影响状况	1~4次/a	
			海水生境	浮游/水生/底栖生物种类、数量、海发光	反映海水水质及生长动植物特征、生长状况	1次/5a	
		⑫地下水数量质量模块	地下水资源数量	地下水类别	地下水类型、泉类型	反映地下水类型特性	1次/5a
				地下水资源量	补给量-消耗量	估算地下水资源量	1次/a
				地下水径流量	含水层厚度、水位、断面宽度	计算地下水径流量、水力坡度	1次/a
	相邻含水层越流量	渗流速度、临界水头梯度		计算相邻含水层的越流量	1次/a		
	地下水资源质量	地下水理化生性质	地下水环境	含水层岩性、岩溶含水层中岩溶分布	反映地下水含水层岩性、岩溶分布情况	1~2次/10a	
			土壤物理性质	土壤结构、质地、容重、含水率等	反映土壤水分涵养能力、计算土壤蓄水量等	1~2次/10a	
土壤化学性质		总碳、有机碳、微量元素等	反映土质	1~2次/10a			
土地资源	⑬农用地数量质量共性模块	农用地资源数量	农用地类别	土地类型	反映土地类型特性	1次/5a	
			农用地数量	土地面积、土壤分层厚度	反映土地资源量、计算涵养水源量	1次/5a	
		农用地资源质量	农用地特征	地面坡度、坡向	反映地表单元朝向、陡缓程度及日照情况	1次/5a	
			土壤物理性质	土壤结构、质地、容重、含水率等	反映土壤水分涵养能力、计算土壤蓄水量等	1~2次/10a	
			土壤化学性质	总碳、有机碳、微量元素等	反映土质	1~2次/10a	

续表4

资源大类	归类模块名称	一级指标	二级指标	三级指标	指标功能	观测频次
土地资源	农用地资源质量	土壤生物性质	土壤生物性质	微生物群落类别、数量、比率等	反映土壤环境、改善土壤养分状况	1~2次/10a
			生境质量	土壤动物种类、数量、活动状态	反映土壤提供生境情况	1~2次/10a
	⑭耕地数量质量特性模块	耕地资源数量	耕地类别	轮作体系	反映耕地使用机制	1次/1a
			耕地数量	年耕地播种总面积	计算耕地复种指数	2次/1a
		耕地资源质量	耕地土壤物理性质	田间持水量、最大吸湿水量、总孔隙度等	反映土壤水分动态特征,计算吸湿系数、凋萎系数	1次/5a
			耕地土壤化学性质	0~20 cm表层土壤碱解氮、速效钾/磷等	反映表层土壤养分、交换性能	1次/5a
	⑮冻土数量质量模块	冻土资源质量	耕地土壤生物性质	土壤酶活性、耕作层根生物量	判断土壤生物化学过程强度,评价土壤肥力水平等	1次/5a
			土壤团聚体稳定性	团粒结构、团聚体分形维数、成分含量等	反映土壤结构、物理形状及水稳性,计算分散系数	1次/5a
			冻土资源数量	冻土面积、厚度、上/下限深度	计算地下冰储量,推测冻土分布范围	1次/5a
			冻土物理性质	活动层温度/湿度、未冻水含量、导热率等	反映土壤特性、评价冻土水分迁移、冻结状态等	1次/5a
			冻土化学性质	有机质总量、易溶盐含量等	反映冻土土质(包含盐渍化/泥炭化多年冻土)	1次/5a
			冻土生物性质	微生物种类、数量	反映冻土环境	1次/5a
			冻土强度特性	抗压/抗剪/抗拉强度	计算冻土强度	1次/5a
			冻土冻胀特性	冻胀率、地表冻胀量、冻结层厚度	反映冻土冻胀作用状况,计算冻胀性分级等	1次/5a
	冻土融化下沉特性	孔隙比、冻土融化体积压缩系数等	计算融化下沉性等级	1次/5a		
	⑯可利用海滩数量质量模块	可利用海滩资源数量	海滩类别及数量	海滩类型、海滩面积等	反映可利用海滩类型特性及面积情况	1~2次/10a
			可利用海滩资源质量	海滩特征	前滨宽度、海滩长度、干滩厚度等	反映潮间带距离及可利用海滩规模
		可利用海滩资源质量	沉积物性质	表层/底质沉积物粒度、元素组成等	反映介质流动性,沉积水动力环境	1~2次/10a
			生境质量	土壤动物种类、数量	反映可利用海滩生物生态环境	1~2次/10a

流横截面积、流速等指标计算区域江、河、湖、库水资源量;冰川资源主要关注冰川、永久性积雪的数量和形态变化等信息,通过冰川长度、宽度、密度面积和厚度计算冰川冰储量,通过积雪面积、各雪层深度和雪水当量估算积雪体积和雪水完全融化储量。地下水模块中,根据现有技术及条件,通过补给量减去消耗量的方式估算地下水资源数量,依据地下含水层的厚度、地下水水位、断面宽度等计算地下水径流量。

土地资源是指在一定技术经济条件下可以为人类利用的土地,即已经开垦利用的土地和可以利

用而尚未利用的土地^[37],包括农用地(林地、草地、耕地)和未利用地(冻土、海滩)等。农用地共性模块主要关注土地类型、土地面积、土壤分层厚度、坡度坡向、土壤结构、质地、容重和成分含量等信息,反映土地资源数量和土壤品质。耕地特性模块侧重关注耕地轮作体系、耕种面积田间持水量、土壤养分和团聚体稳定性等方面。冻土模块关注冻土冻结状态、冻胀作用和融化下沉特性等。对于海滩资源的观测,主要关注海滩的类别、特征、沉积物性质及提供生境质量,以反映海滩类型特性、海滩分布状况及规模、沉积水动力环境和物质交换情况。

4.1.2 资源间相互作用过程模块

资源间相互作用过程模块共20个,气候相关作用过程(9个)、非气候相关作用过程(11个),其中20个一级指标,49个二级指标,137个三级指标(不含重复项)。该模块主要包含自然资源动态变化、相互作用过程方面的指标(表5)。

气候资源与其他自然资源密切相关,特别是水资源。气候变化会影响地表覆盖资源的面积分布、植被群落、结构功能等的变化。因此,关注气候资源的变化和其他自然资源的相互作用过程,对认识自然资源的变化动因机制、发展过程和演化趋势起着至关重要的作用。

鉴于大气降水、沉降等对地表覆盖资源的普遍影响,设计气候作用过程共性模块,观测日降水量、降水强度、干/湿沉降总量等指标,记录气候资源对其他资源的影响情况。地表水、冰川、海面、土地、

冻土资源受气温、湿度、风等影响,发生蒸发、升华、凝华、融化、凝固、风蚀等作用,促进自然资源间水分和热量的循环。植被资源在降水、辐射、气温等影响下,进行蒸腾、光合、呼吸作用,促进植物的生长和自然界物质交换。

非气候相关作用过程包括:地表水和地下水的相互补给,地表水、地下水和土地间的渗流、侵蚀改造,土地与植被的水分供给、呼吸、保育作用,冰川融化对水资源的补给和与土地、冻土间的热量传递。通过观测地下水位判断区域内地表水与地下水的相互补给;河水输沙量及河沙中值粒径反映流域水土流失程度,结合河道下蚀深度、河流曲率反映河水对地貌的改造程度;根系茎流值、树干茎流量等反映植物吸水量;冰川融水截面积、流速、水位等指标计算融水径流量,反映冰川消融情况和对地表/地下水资源的补给。

表5 自然资源要素综合观测指标体系资源间相互作用过程模块(部分三级指标和指标功能参考[18,19,38,39])

Table 5 Resource interaction processes module of the comprehensive observation indicator system of natural resource elements
(Partially adapted from [18,19,38,39])

归类模块名称	一级指标	二级指标	三级指标	指标功能	观测频次
⑰气候作用过程共性模块	气候作用过程共性	凝结作用	日降水量、雨滴中值粒径等	估算大气降水量	1次/d
		凝华凝固作用	降雪雪深、最大冰雹直径等	反映大气降雪→其他资源补充	1次/月
		降水化学性质	降水酸碱度、氢氧同位素等	反映大气水分性质	1次/a
		沉降作用	干/湿沉降总量、电导率等	反映大气干湿沉降情况	1次/a
⑱气候与地表水作用模块	气候与地表水作用	气温影响	水面温度	反映大气→地表水的影响	1次/d
		蒸发作用	水面蒸发量	反映地表水→大气补充	1次/d
		⑲气候与植被作用过程共性模块	气候与植被作用过程共性	气温影响	露点温度、有效积温等
散发(蒸腾)作用	气孔导度、植物蒸腾效率	反映植物调节气候、涵养水分		实时观测	
光合作用	生态系统呼吸、释放氧气量等	反映植物调节气候、释放氧气		实时观测	
⑳气候与林木作用模块	气候与林木作用	固氮作用	固氮量	反映植物营养积累量	1~4次/a
		降水作用	林冠截留雨量	反映林冠→降雨的截留作用	1次/月
		散发(蒸腾)作用	树干蒸腾量	反映林木→气候调节	1次/月
㉑气候与冰川作用模块	气候与冰川作用	升华作用	林冠截雪升华量	反映林冠→大气水分的补给	1次/月
		气温影响	表面温度、冰川水氢、氧同位素	反映水汽凝结时的气温变化	1次/d
		升华作用	积雪升华量、升华潜热等	反映气候变化、水量/能量平衡	1~2次/月
		融化作用	冰川上/下游海拔、雪线等	推算冰川消融量	1次/季

续表5

归类模块名称	一级指标	二级指标	三级指标	指标功能	观测频次
②气候与海水作用模块	气候与海水作用	气温影响	海平面气温、气压	反映大气→海面的影响	1次/d
		蒸发作用	海平面蒸发量	反映海面→大气补充	1次/d
③气候与土地作用模块	气候与土地作用	气温影响	地表温度	反映大气→土地的影响	1次/d
		热交换	土壤感热/潜热通量	反映大气→土地的热交换	实时观测
		蒸发作用	土壤水分蒸发量	反映土壤→大气补充	实时观测
		呼吸作用	土壤呼吸速率、甲烷排放通量	反映土壤→大气补充	实时观测
		风蚀作用	土壤风蚀量、风沙流输沙量	反映大气→土地的剥蚀搬运	1次/月
④气候与冻土作用模块	气候与冻土作用	气温影响	冻土地表温度	判断冻土中冰升华	1次/d
		热交换	活动层土壤感热/潜热通量	反映大气→冻土的热交换	实时观测
		呼吸作用	冻土碳通量	反映碳循环、调节气候作用	实时观测
		凝华凝固作用	季节冻结深度	反映大气→季节性冻土影响	1次/季
		融化作用	季节融化深度	反映大气→季节性冻土影响	1次/季
		升华作用	冻土表面升华量	反映气候变化、水量/能量平衡	1次/月
⑤气候与地下水作用模块	气候与地下水作用	渗流作用	降水入渗面积、入渗补给系数	计算降水入渗补给量	1次/a
		蒸发作用	潜水蒸发系数	估算潜水蒸发量	1次/a
⑥地表水资源利用模块	地表水资源利用	利用量	湖库取水量、泵站提水量等	反映人类利用情况	1次/月
⑦地表水与土地作用模块	地表水与土地作用	渗流作用	河床坡度、渗流速度等	反映地表水→土地水分补充	1次/a
		水蚀作用	输沙量、中值粒径	反映流域水土流失程度	1次/a
		地貌改造	河道下蚀深度、河流曲率等	反映河水对地貌改造程度	1次/5a
⑧地表水与地下水作用模块	地表水与地下水作用	补给作用	潜水水位、泉水溢出量、地表/地下水氢氧同位素	反映地表水↔地下水相互转化	1次/a
⑨土地与植被作用过程共性模块	土地与植被作用过程共性	供给水分	根系茎流值、根系分布形态等	反映土壤→植物提供水分	实时观测
		呼吸作用	根系呼吸速率	反映碳排放中根系的贡献率	实时观测
		保育作用	枯落物持水量	反映植物→土壤保育,涵养水分	1次/季
⑩土地与林木作用模块	土地与林木作用	供给水分	树干茎流量	反映土壤→林木提供水分	实时观测
		保育作用	枝/叶干重、落叶/腐殖质厚度	反映林木提供生境、保育土壤	1次/季
⑪土地与草作用模块	土地与草作用	保育作用	枯草/杂物干重	反映草→土壤保育	1次/季
⑫土地与作物作用模块	土地与作物作用	供给水分	茎流量	反映土壤→作物提供水分	实时观测
		保育作用	杂物干重、腐殖质厚度	反映作物→土壤保育	1次/季
⑬土地与地下水作用模块	土地与地下水作用	渗流作用	土壤水氢氧同位素等	反映土壤水分动态、转化情况	1次/2a
⑭冰川与地表水、地下水作用模块	冰川与地表水、地下水作用	融化作用	冰川融水截面积、流速、水位、流向	计算融水径流量、反映冰川消融情况	1次/季
⑮冰川与冻土作用模块	冰川与土地、冻土作用	热量传递	热传导率	反映冰川↔土地、冻土间热量传递情况	1次/5a
⑯地下水资源利用模块	地下水资源利用	利用量	开采量、土地灌溉面积/定额	计算耕地灌溉水入渗补给量	1次/5a
		补给作用	人工回灌补给量	估算补给量	1次/5a

4.2 立体综合观测指标体系组合

依据自然资源空间结构特征,参考生态系统分类方法,建立陆地水面区、植被覆盖区(森林、草原、农田)、裸地区、冰川-冻土区、过渡区(湿地)、海岸区6大资源要素综合观测系统。根据各系统需要观测的自然资源和资源间相互作用,从36个“归类模块”中选取相应的资源数量质量模块和资源间相互作用过程模块组合成模块集(图3)。

各种观测方法所适用的时间尺度和空间尺度有很大差别,自然资源系统的综合观测需要采用多种技术方法的合理组合,综合利用适合于个体尺度、景观尺度、区域尺度的各种观测手段,如卫星遥感、涡度相关观测塔、地面手持观测仪等,耦合成一个大气-地表-地下综合的多层次立体化观测体系。此外,由于观测手段、观测仪器及型号存在差异,故在实践过程中应重点注意观测频率和观测精度受到的影响。特别是卫星遥感数据的应用需充分考虑其可获得的数据分辨率。

4.3 赋能模块

赋能模块是综合观测指标体系中不可或缺的一环,也是观测数据实现价值转化的重要部分。该模块数量不限,包括水量平衡模块、热量平衡模块、盐平衡模块、碳通量模块、氮通量模块、土壤质量模块、空气质量模块和森林水源涵养模块等,具有可扩展性,依据观测数据特征、功能和相关理论模型,结合国家战略、经济发展、科学研究、环境保护等方

面的实际需求构建,以解决实际问题、预测自然资源时空演变规律与发展趋势为目标,实现观测数据科学、有效利用和成果转化。

4.4 应用实例

4.4.1 立体综合观测模块集实例

以森林资源为典型实例(图4)。①个体尺度上,重点观测单棵树木的生长量、品质,和气体、水分、养分交换情况。通过光学测树仪、植物茎秆生长测量仪观测树木高度、树干胸径指标,计算树高年平均生长量、胸径年平均生长量,掌握单株活立木木材量和树木生长状况信息;采用植物根系生长监测系统长期观测植物根系生长及分布形态,表征植物生长和养分吸收情况;使用光合作用仪观测叶片光合作用速率,反映光合作用过程中的气体交换。②景观尺度上,侧重于关注森林群落的分布面积和特征。通过卫星遥感观测森林类型、种类和植被面积,反映森林资源数量现状;通过多光谱冠层指数测量仪观测植被覆盖度,反映植被生长茂密程度。③区域尺度上,更关注树木和森林与其他自然资源间的相互影响及耦合作用,通过自动气象站、闭路涡动相关系统、激光雨滴谱仪等设备对大气水分、光能热量、风能和大气成分数量质量模块以及气候作用过程共性模块指标进行观测,掌握气候作用对森林资源的影响;通过多通道土壤温度气体通量测量系统,观测气候与土地作用模块中土壤与大气间的 CH_4 、 CO_2 等气体的通量,了解土壤与大气间

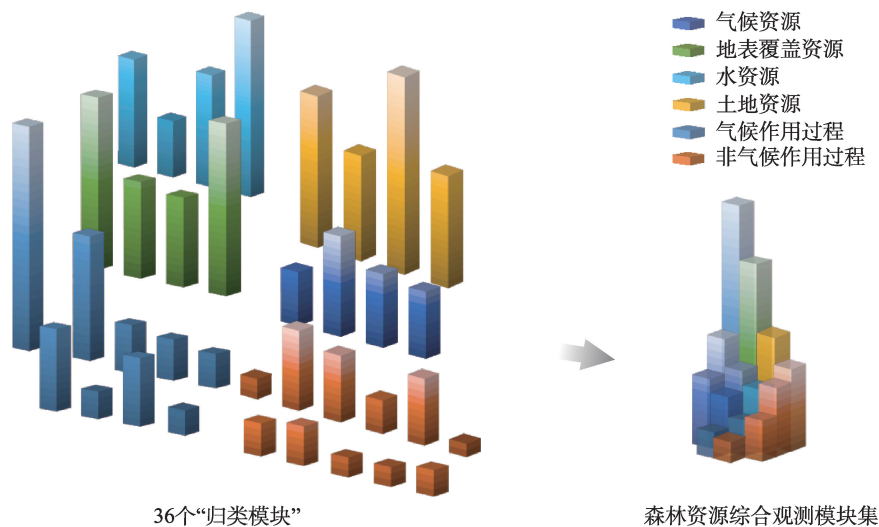


图3 立体综合观测指标模块抽取与组合过程示例

Figure 3 Example of the process of extracting and combining multidimensional comprehensive observation indicator modules

2020年10月

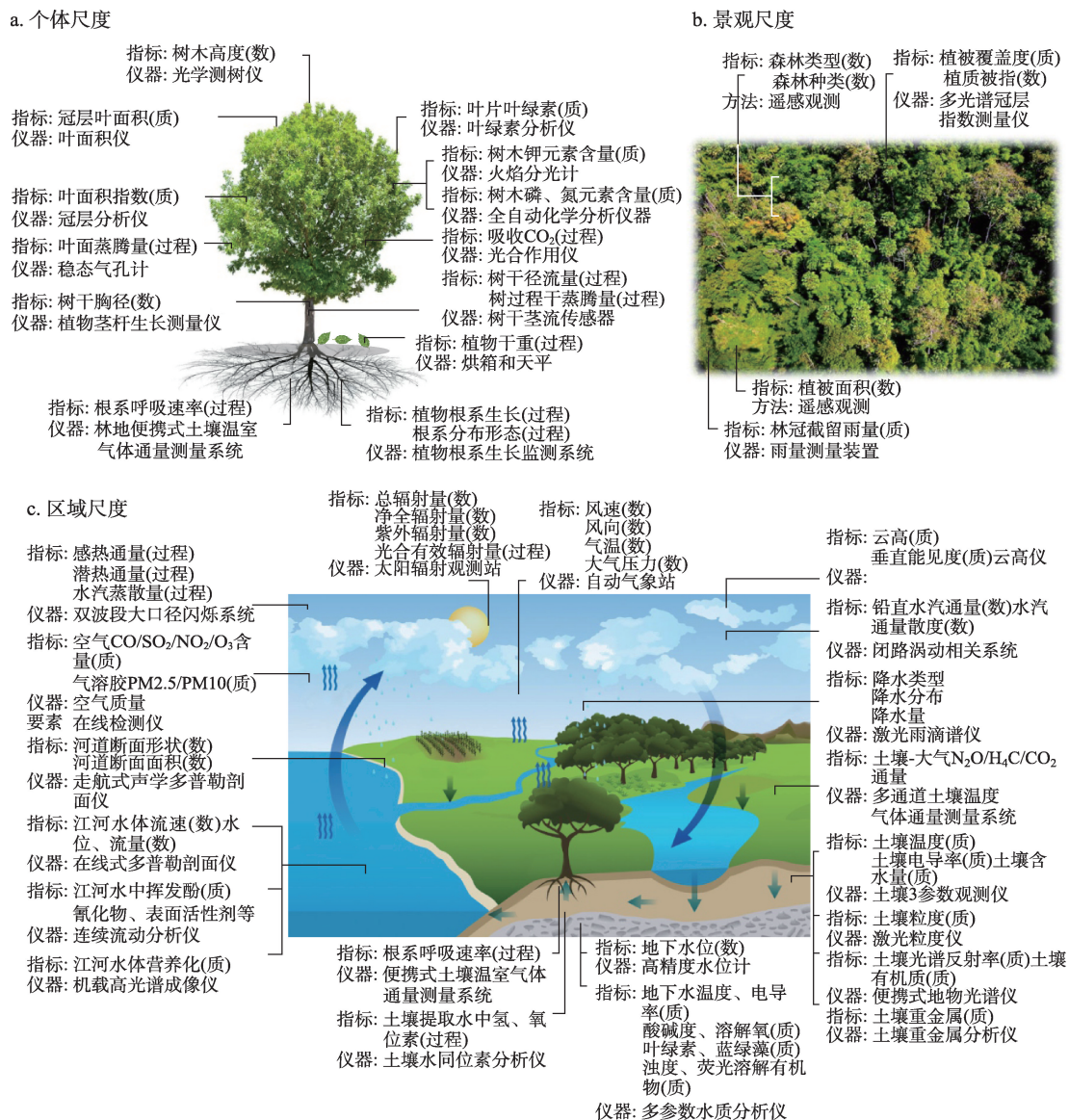


图4 个体(a)、景观(b)、区域(c)尺度森林资源综合观测系统指标概览

Figure 4 Overview of the comprehensive observation indicator system of forest resources at the individual (a), landscape (b), and regional (c) scales

呼吸作用过程等。

4.4.2 赋能模块实例

以森林水源涵养模块为例,该模块主要表征森林资源内各个水文过程及其响应,综合体现森林拦蓄降水、调节径流和气候的功能。森林资源系统水分循环主要受到林冠层截留降水、枯枝落叶层截持、土壤入渗、径流及蒸散等因素影响^[40]。常见的森林水源涵养量计算方法包括:土壤蓄水能力法、林冠截留剩余量法、降水储存量法、多因子回归法和综合蓄水能力法等^[41-43]。其中,综合蓄水能力法考虑了不同森林类型的水源涵养量差异和降水对林冠截留量的

影响,有利于进一步实现对森林变化的预测和模拟气候对森林水源涵养的影响。因此,采用综合蓄水能力法估算森林涵养水源的潜力,理论上森林最大水源涵养量为林冠层截留量、枯枝落叶层持水量和土壤层蓄水量的总和。林冠层截留量主要取决于植被类型、林冠结构、郁闭度、植被面积、日降水量等指标;枯枝落叶层持水量与森林流域产流机制有关,并受枯枝物特性、植被类型、降水和地形因素影响;土壤层蓄水量涉及指标包括土壤非毛管孔隙度、植被土层厚度、植被面积和类型。上述指标抽选自多个归类模块,共同组合成森林水源涵养赋能模块(表6)。

表6 森林水源涵养赋能模块

Table 6 Functional module of forest water conservation

森林水源涵养量/(W/m^3)	林冠层截留量/(C/m^3)	枯枝落叶层持水量/(L/m^3)	土壤层蓄水量/(S/m^3)
$W = C + L + S$	$C = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times R \times A_i$	$L = \sum_{i=1}^n \beta_i \times A_i$	$S = \sum_{i=1}^n \gamma_i \times D \times A_i$
公式参数、指标	⑩ 林冠截留率 α /% ⑰ 年最大日降水量 R/mm ⑤ 植被面积 A/m^2 ⑤ 植被类型 i	⑱ 枯枝落叶层最大持水量 $\beta /m^3 \cdot hm^2$ ⑤ 植被面积 A/m^2 ⑤ 植被类型 i	⑫ 土壤非毛管孔隙度 $\gamma/%$ ⑫ 植被土层厚度 D/m ⑤ 植被面积 A/m^2 ⑤ 植被类型 i
其他相关指标	⑥ 林冠结构 ⑥ 郁闭度	⑳ 枝、叶、花果、皮、杂物干重 ㉑ 落叶层、腐殖质厚度	㉒ 维根管植物根系结构 ㉒ 根系分布形态

注:表中“⑥”为表3、表4中相应编号模块。例,“⑥郁闭度”为林木数量质量特性模块中的郁闭度指标。

5 结论与建议

5.1 结论

本文通过分析国内外已有观测指标体系研究现状,结合自然资源要素综合观测特点和新形势下自然资源统一管理的目标要求,构建了自然资源要素综合观测指标体系。主要结论如下:

(1)运用正、反演相结合、模块组合等观测指标体系构建方法,整理、筛选出能够有效反映各类资源数量、质量和资源间相互作用过程的观测指标,进行模块划分和组合,构成综合观测系统模块集。

(2)构建了由36个归类模块、6个资源要素综合观测系统模块集和若干个赋能模块组成的自然资源要素综合观测指标体系。有效应用于陆地水面区、植被覆盖区、裸地区、冰川-冻土区、过渡区、海岸区6大类资源系统从大气-地表-土地多层次、从个体-景观-区域多尺度的立体化综合观测。可根据区域自然资源要素特点,有针对性地快速组合搭建区域自然资源要素综合观测系统。同时,能够实现自然资源要素综合观测网数据与国家生态系统研究等其他相关观测网数据的流通和共享。

5.2 建议

需要指出的是,自然资源种类丰富,系统庞杂,本文基于自然资源的整体性、动态化等观测特点,初步构建了一套自然资源要素综合观测指标体系,建议在下步工作中,还需要考虑各种资源在不同地区存在的禀赋特征差异,重点加强特色指标和特殊指标模块的构建。此外,要借力卫星遥感、航空遥感、无人机、物联网和5G等现代遥感和观测技术的发

展,进一步实现全方位立体观测和重点区域全天候、全时段观测以及数据实时无线传输。

参考文献(References):

[1] 朱岳年. 综合利用自然资源保护人类生存环境[J]. 资源与环境, 1990, 2(3): 77-79. [Zhu Y N. Comprehensive utilization of natural resources to protect human living environment[J]. Journal of Resources and Environment, 1990, 2(3): 77-79.]

[2] 潘文岚. 中国特色社会主义生态文明研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2015. [Pan W L. Research on Ecological Civilization of Socialism with Chinese Characteristics[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2015.]

[3] 伍大荣. 加强自然资源管理的现实选择[J]. 资源科学, 1995, 17(1): 16-22. [Wu D R. A practical choice to strengthen natural resources management[J]. Resources Science, 1995, 17(1): 16-22.]

[4] 孟微波, 倪劲松, 周建斌. 自然资源调查探索与实践: 以江苏省如东县试点为例[J]. 中国土地, 2019, (5): 19-22. [Meng W B, Ni J S, Zhou J B. Investigation and practice of natural resources: A case study of Rudong County in Jiangsu Province[J]. China Land, 2019, (5): 19-22.]

[5] 严竞新, 殷小庆, 陈骏, 等. 自然资源调查与监测标准现状分析[J]. 测绘标准化, 2019, 35(4): 1-4. [Yan J X, Yin X Q, Chen J, et al. Analysis of the developments of standards for natural resources investigation and monitoring[J]. Standardization of Surveying and Mapping, 2019, 35(4): 1-4.]

[6] 王容, 袁婷, 张亚. 湿地生态环境影响评价研究的进展[J]. 青海环境, 2015, 25(4): 187-190. [Wang R, Yuan T, Zhang Y. Research progress of wetland ecological environmental impact assessment[J]. Journal of Qinghai Environment, 2015, 25(4): 187-190.]

[7] 黄贤金. 自然资源统一管理: 新时代、新特征、新趋向[J]. 资源科学, 2019, 41(1): 1-8. [Huang X J. Unified management of natural resources: A new era, new characteristics, and new trend[J]. Re-

2020年10月

- sources Science, 2019, 41(1): 1–8.]
- [8] 董祚继. 新时代国土空间规划的十大关系[J]. 资源科学, 2019, 41(9): 1589–1599. [Dong Z J. Ten relations of territorial planning in the new era[J]. Resources Science, 2019, 41(9): 1589–1599.]
- [9] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 379–395. [Feng Z M, Yang Y Z, Yan H M, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th century: From theory to practice[J]. Resources Science, 2017, 39(3): 379–395.]
- [10] 匡文慧. 新时代国土空间格局变化和美丽愿景规划实施的若干问题探讨[J]. 资源科学, 2019, 41(1): 23–32. [Kuang W H. Issues regarding on spatial pattern change of national land space and its overall implementation on beautiful vision in new era[J]. Resources Science, 2019, 41(1): 23–32.]
- [11] Pulliainen J, Luoju K, Derksen C, et al. Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018[J]. Nature, 2020, 581: 294–298.
- [12] Napolskikh D L, Yalyalieva T V, Larionova N I, et al. System of criteria and indicators for the development of resource-based multiclusters[J]. Advances in Systems Science and Applications, 2016, 16(4): 22–28.
- [13] Huysman S, Sala S, Mancini L, et al. Toward a systematized framework for resource efficiency indicators[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 95: 68–76.
- [14] 丁访军. 森林生态系统定位研究标准体系构建[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011. [Ding F J. Construction of Standard System for Forest Ecosystem Long-term Research[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.]
- [15] 赵士洞. 美国国家生态观测站网络(NEON): 概念、设计和进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 578–583. [Zhao S D. United States National Ecological Observatory Network: With special references to its concepts designing and progress[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(5): 578–583.]
- [16] Gao L, Bryan B A. Finding pathways to national-scale land-sector sustainability[J]. Nature, 2017, 544: 217–222.
- [17] Bringezu S, Potocnik J, Schandl H, et al. Multi-scale governance of sustainable natural resource use: Challenges and opportunities for monitoring and institutional development at the national and global level[J]. Sustainability, 2016, 8(8): 778–778.
- [18] 潘贤章, 吴冬秀, 袁国富, 等. CERN观测指标、方法及规范的研究与修订[R]. 北京: 中国科学院, 2018. [Pan X Z, Wu D X, Yuan G F, et al. Research and Revision of CERN Observation Indicators, Methods and Specifications[R]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2018.]
- [19] 袁国富, 朱治林, 张心昱, 等. 陆地生态系统水环境观测指标与规范[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2019. [Yuan G F, Zhu Z L, Zhang X Y, et al. Terrestrial Ecosystem Observation Index of Water Environment and the Specification[M]. Beijing: China Publishing Group Environment, 2019.]
- [20] 于贵瑞, 孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008. [Yu G R, Sun X M. Carbon Flux Measurement Technology and Spatial Temporal Variation Characteristics of Terrestrial Ecosystems in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.]
- [21] 中国科学院碳循环项目办公室. 中国陆地生态系统通量观测网络研究进展[J]. 资源科学, 2005, 29(1): 160. [Office of Carbon Recycling Program, Chinese Academy of Sciences. Research progress of Terrestrial ecosystem flux observation network in China[J]. Resources Science, 2005, 29(1): 160.]
- [22] 陈善荣, 陈传忠. 科学谋划“十四五”国家生态环境监测网络建设[J]. 中国环境监测, 2019, 35(6): 1–5. [Chen S R, Chen C Z. Scientific planning for the construction of the National Ecological Environmental Monitoring Network in the 14th Five-Year Plan period[J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(6): 1–5.]
- [23] 中华人民共和国自然资源部. 自然资源科技创新发展规划纲要[EB/OL]. (2018–11–06) [2020–06–15]. http://www.mnr.gov.cn/gk/tzgg/201811/t20181113_2364664.html. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Outline of Scientific and Technological Innovation and Development Plan for Natural Resources[EB/OL]. (2018–11–06) [2020–06–15]. http://www.mnr.gov.cn/gk/tzgg/201811/t20181113_2364664.html.]
- [24] 傅伯杰, 田汉勤, 陶福祿, 等. 全球变化对生态系统服务的影响[J]. 中国基础科学, 2017, 19(6): 14–18. [Fu B J, Tian H Q, Tao F L, et al. The impact of global change on ecosystem services[J]. China Basic Science, 2017, 19(6): 14–18.]
- [25] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 341–348. [Fu B J, Yu D D, Lv N. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 341–348.]
- [26] 崔向慧, 卢琦, 郭浩. 荒漠生态系统长期观测标准体系研究与构建[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1121–1126. [Cui X H, Lu Q, Guo H. Construction of standard system for long-term observation of Chinese desert ecosystem[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(6): 1121–1126.]
- [27] 郭旭东. 土地资源数量质量生态监测指标体系研究[J]. 国土资源情报, 2014, (10): 32–38. [Guo X D. Research on index system of land resource quantity, quality and ecological monitoring[J]. Land and Resources Information, 2014, (10): 32–38.]
- [28] 李颖, 张占月, 陈庆华. 空间对地观测系统指标体系研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2011, 22(5): 51–54. [Li Y, Zhang Z Y, Chen Q H. Research on parameters system of space-to-earth ob-

- servation system[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2011, 22(5): 51–54.]
- [29] 曹燕丽, 崔向慧, 卢琦, 等. 荒漠生态系统定位观测方法与指标体系探讨[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 619–624. [Cao Y L, Cui X H, Lu Q, et al. Discuss on measures and indicators of long-term observation for desert ecosystem in China[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(4): 619–624.]
- [30] 杨文刚, 黎明锋. 湖泊生态气象监测指标体系、监测方法初探[R]. 长沙: 全国优秀青年气象科技工作者学术研讨会论文集, 2006. [Yang W G, Li M F. Proceedings of the National Outstanding Young Meteorologists Academic Symposium[R]. Changsha: Preliminary Study on the Index System and Monitoring Method of Lake Ecological Meteorology, 2006.]
- [31] Lopez R S, Keulen H, Ittersum M K, et al. Multi-scale sustainability evaluation of natural resource management systems: Quantifying indicators for different scales of analysis and their trade-offs using linear programming[J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2005, 12(2): 81–97.
- [32] 王兵, 董娜. 林业生态环境监测数据采集[J]. 林业科技管理, 2003, 12(3): 31–32. [Wang B, Dong N. Collection of forestry eco-environment data[J]. Forest Science & Management, 2003, 12(3): 31–32.]
- [33] 章光新, 武瑶, 吴燕锋, 等. 湿地生态水文学研究综述[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 737–749. [Zhang G X, Wu Y, Wu Y F, et al. A review of research on wetland ecohydrology[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5): 737–749.]
- [34] 邓先瑞, 汤大清, 张永芳. 气候资源概论[M]. 武汉: 华中师范大学出版社, 1995. [Deng X R, Tang D Q, Zhang Y F. Introduction to Climatic Resources[M]. Wuhan: Central China Normal University Press, 1995.]
- [35] 傅抱璞, 毛政旦, 陈万隆, 等. 气候资源与开发利用[M]. 北京: 气象出版社, 1995. [Fu B P, Mao Z D, Chen W L, et al. Climate Resources and Development and Utilization[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995.]
- [36] 霍治国, 李世奎, 王石立. 中国气候资源[M]. 北京: 科学普及出版社, 1993. [Huo Z G, Li S K, Wang S L. Climatic Resources of China[M]. Beijing: Popular Science Press, 1993.]
- [37] 谭术魁, 陈莹. 土地资源学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2011. [Tan S K, Chen Y. Land Administration[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2011.]
- [38] Wan N F, Zheng X R, Fu L W, et al. Global synthesis of effects of plant species diversity on trophic groups and interactions[J]. Nature Plants, 2020, 6(5): 503–510.
- [39] Duveiller G, Hooker J, Cescatti A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 679.
- [40] 蒙作主. 区域森林变化与水源涵养功能估算及系统实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2019. [Meng Z Z. Evaluation and System Realization for Regional Forest Change and Water Conservation Function[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.]
- [41] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J]. 生态学杂志, 2009, 28(3): 529–534. [Zhang B, Li W H, Xie G D, et al. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(3): 529–534.]
- [42] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 等. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1019–1030. [Wang X X, Shen H T, Li X Y, et al. Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1019–1030.]
- [43] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 603–611. [Liu L L, Cao W, Shao Q Q. Water conservation function of forest ecosystem in the Southern and Northern Pan River Watershed[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(4): 603–611.]

Discussion on the indicator system of comprehensive observation of natural resource elements

ZHANG He¹, WANG Shaoqiang^{2,3}, WANG Liang⁴, CHENG Shubo⁵, JIANG Zhenglong¹,
ZHANG Zifan³

(1. School of Marine Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. Center for Geophysical Survey, China Geology Survey, Langfang 065000, China; 5. School of Emergency Management, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to achieve the sustainable management and efficient use of natural resources, long-term, stable, and continuous comprehensive observations are necessary for acquiring basic resource data and information on resource types, quantity, quality, and processes of interactions. It is necessary to construct an indicator system of the comprehensive observation of natural resources. However, due to the lack of a unified indicator system of natural resources observation in China, there exist big gaps in observation and management between different regions, which make it difficult to standardize the management and improve the utilization of natural resources on a national scale. Hence, a scientific, systematic, and normative indicator system of comprehensive observations, which can be applied on a national scale in China, is urgently needed. Based on the primary issues to be addressed and with reference to the existing indicator systems in China and internationally, the authors summarized the basic principles of establishing the indicator system and the selection of indicators. On the basis of the classification of natural resource elements, the authors established a comprehensive observation indicator system that consists of 36 classification modules, 6 comprehensive observation subsystems, and several functional modules, by a combination of forward and inverse inference methods, modularization, and other construction methods. Through the establishment of a multidimensional comprehensive observation network across the atmosphere-surface-subsurface levels and the individual-landscape-regional scales, the data of natural resource elements can be obtained and the management, evaluation, and utilization of natural resources can be achieved.

Key words: comprehensive observation; natural resources; indicator system; elements; observation methods