

# 最后间冰期至未来2070s中国潜在自然植被 时空分布格局及其对气候变化的响应

任正超<sup>1,2</sup>, 朱华忠<sup>3</sup>, 史华<sup>4</sup>, 柳小妮<sup>5</sup>

(1. 甘肃农业大学财经学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省生态建设与环境保护研究中心, 兰州 730070;  
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 美国地质调查局地球资源观测与科学研究中心,  
苏福尔斯 57198; 5. 甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070)

**摘要:** 潜在自然植被(PNV)对生态环境的修复与重建、自然保护区的规划与建设和农牧业的生产与发展均有着重要的指导作用。研究基于综合顺序分类系统(CSCS),利用最后间冰期至未来2070s六个时期的温度和降水量数据,模拟中国PNV的时空分布格局及其对气候变化的响应。研究表明:(1)CSCS将六个时期中国PNV分别划分为39、37、38、40、40和40类以及10个类组。(2)寒冷干旱型类组主要分布在西北,温暖湿润型和炎热潮湿型则分布在中东部和南方。除冻原和高山草地、冷荒漠、半荒漠和温带森林草地4个类组呈现下降趋势外,其余均为上升趋势。(3)温带森林草地转变为亚热带森林草地的面积最大,占总变化面积的35.4%。(4)CSCS既未包含人类活动影响因素,又能模拟长时间序列的PNV演替。(5)最后间冰期至未来2070s,森林类组向纬度和海拔高度更高的北方及青藏高原移动。研究结果进一步明确了PNV概念的界限,揭示了气候变化对PNV演替的作用机理。

**关键词:** PNV; CSCS; 时空格局; 气候变化; 植被分类体系

潜在自然植被(Potential Natural Vegetation, PNV)的研究对现存自然植被的利用与管理<sup>[1]</sup>、自然资源的开发与保持<sup>[2,3]</sup>和气候变化效果的模拟与预测<sup>[4-6]</sup>都具有重要的指导意义。PNV的概念由Tüxen<sup>[7]</sup>于1956年提出,其假设在现有的环境条件下(如气候和土壤条件,包括由人类所创造的条件)和没有人为干扰时植被完成全部演替过程后,立地应该存在的植被。PNV的概念及其应用在学术界一直存在争议。争议主要聚焦在:(1)PNV的概念是否应该包含人类活动影响因素(人类干扰问题);(2)PNV能否动态表达植被的发展与演替过程(时间序列问题)<sup>[8-13]</sup>。Zampieri等<sup>[14]</sup>利用VERDE(Vegetation Reconstruction by Diagnostic Equilibrium)模型对全球的PNV进行了模拟。Fischer等<sup>[15]</sup>和Reger等<sup>[16]</sup>基于环境预测因子、统计模型以及TRM(a three-dimensional system of the ecological gradients Temperature, soil Reaction, and soil Moisture)三维模型,对德国巴伐利亚国家森林公园及其毗邻的捷克共和国舒马瓦国家公园以及拜恩阿尔卑斯山地区的PNV进行了划分,并制作了相应的PNV分布图。Aguilar等<sup>[3]</sup>和Jackson<sup>[17]</sup>对北美和西班牙加那利群岛的自然植被、潜在植被和实际植被进行了对比分析和归纳总结,并针对典型植被群落提出了相应的保护建议措施。赵传燕等<sup>[18]</sup>和Liu等<sup>[19]</sup>依据气象数据和地形条件或者植被和环境之间的统计关系对我国黄土高原祖厉河流域和东北地区PNV的空间分布格局进

收稿日期: 2019-04-18; 修订日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(30960264, 31160475); 甘肃农业大学校派青年出国留学访问学者项目

作者简介: 任正超(1983-), 男, 四川渠县人, 硕士, 讲师, 主要从事草地类型划分及草地碳循环研究。

E-mail: renzhengchao2008@163.com

行了模拟研究。Yuan 等<sup>[20]</sup>和赵茂盛等<sup>[21]</sup>利用植被和气候的关系以及 IBIS (Integrated Biosphere Simulator) 和 MAPSS (Mapped Atmosphere-Plant-Soil System) 模型对当前和未来气候变化下的我国 PNV 类型进行模拟分析。Wang 等<sup>[6]</sup>利用 BIOME 4 (生物地理耦合) 模型对我国的 PNV 进行模拟, 并重点进行 PNV 分布格局对温度、降水量和 CO<sub>2</sub> 的敏感性分析。以上研究从 PNV 的概念、时空分布格局和对自然条件的响应等方面进行深入的剖析, 但是研究的时间序列较短, 无法了解历史气候变化对 PNV 的演替作用, 并且采用的模型对区域 PNV 划分的类型较少, 无法对全球范围内的 PNV 进行有效的时空模拟。

综合顺序分类系统 (Comprehensive and Sequential Classification System, CSCS) 以生物气候特征为基础, 用年降水量  $r$  和  $\geq 0$  °C 年积温  $\Sigma\theta$  的比值划分湿润度  $K$ , 且将具有同一热量级和湿润度级相结合的自然植被划分为类。将全球自然植被划分为 42 类, 包括草原、荒漠、森林和冻原等陆地自然景观<sup>[22]</sup>。李飞等<sup>[23-26]</sup>依据地貌和植被分布特点, 利用 GIS (Geographic Information System) 技术和地统计学方法, 结合生态信息图谱, 实现西北干旱半干旱区和中国 PNV 的划分。柳小妮等<sup>[27]</sup>将地形特征如海拔高度、坡度和坡向等与气候要素 (温度和降水量) 之间建立回归模型, 并应用于气象要素空间插值法中, 较高精度地划分中国 PNV 类型, 其空间分布较好地体现了 PNV 的地带性分布规律。Liang 等<sup>[22]</sup>、任继周等<sup>[28]</sup>和 Feng 等<sup>[29,30]</sup>利用 CSCS 理论和气候数据划分青藏高原和全球的 PNV, 并分析当前和未来气候变化该地区 PNV 的演替方向、碳动态及其对气候变化的响应。上述学者不仅利用 CSCS 划分了区域和全球的 PNV, 而且也从应用的视角利用信息技术和数学模型对 CSCS 理论进行验证和扩展<sup>[31]</sup>。但是, 将 CSCS 和国际上通用的 PNV 划分模型进行详细对比以及利用 CSCS 对更长时间序列的历史和未来气候变化预测情景下的 PNV 类型进行划分、时空格局演变和对气候变化的响应分析等研究较少。

基于上述原因, 研究以下几个方面: (1) 利用最后间冰期、末次盛冰期、全新世中期、当前时期、未来 2050s 和未来 2070s 六个时期的气象数据和 CSCS 模型对中国区域的 PNV 类型进行详细的划分。(2) 分析中国 PNV 类型的时空格局及其演变过程以及对长时间序列气候变化的响应模式。(3) 梳理其他 PNV 分类模型和 CSCS 分类体系的本质, 提出了 CSCS 属于 PNV 的范畴, 并将其与国际上通用的几种模型进行详细对比。以进一步明确 PNV 概念的界限, 揭示气候变化对 PNV 演替的作用机理, 回答上述两点争议, 丰富 PNV 的研究内容, 对退化自然植被的恢复与重建、生态环境的保护与修复和农牧业的稳产增收提供一定的参考价值。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 数据来源及处理

#### 1.1.1 气象数据来源及预处理

气象数据包括月均温和月降水量, 分为过去、当前和未来三个时段, 来源于全球气候数据库 (Global Climate Data, [www.worldclim.org](http://www.worldclim.org))。过去时段包含最后间冰期 (约 120000—140000 年前)、末次盛冰期 (约 22000 年前) 和全新世中期 (约 6000 年前) 三个时期。当前时段为 1950—2000 年。未来时段包含 2050s (2041—2060 年) 和 2070s (2061—2080 年) 两个时期。月降水量、月均温数据分别是根据全球 47554、24542 个气象站点的观测数据采用薄盘平滑样条法 (Thin plate smoothing splines in ANUSPLIN software) 空间插值而成。未来时段的月均温和月降水量选取 IPCC 5 (Intergovernmental

Panel on Climate Change) 报告中的 RCP 2.6 (Representative Concentration Pathways) 场景预测数据。为了便于 PNV 类型的划分, 依据 CSCS 类一级的划分指标 ( $\geq 0$  °C 年积温  $\Sigma\theta$  和年降水量  $r$ ), 本文将月降水量和月均温数据进行筛选和求和后形成  $\geq 0$  °C 年积温和年降水量数据。

### 1.1.2 基础地理数据和中国 PNV 类型数据

中国行政区划图来源于国家自然资源部标准地图服务网 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>)。中国 PNV 类型数据是依据 CSCS 原理, 利用中国 1961—2004 年 2796 个站点的气象要素 (温度和降水量) 和 1 km 空间分辨率的 DEM (Digital Elevation Mode) 数据以及多元回归残差分析法 (Analytic Method based on Multiple Regression and Residues, AMMRR) 生产而成, 并已在期刊公开发表。该数据将中国 PNV 划分为 41 类 (无 VIIA 7 炎热极干热带荒漠类), 较详细地表现了中国 PNV 空间分布的水平和垂直地带性特征<sup>[27]</sup>。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 PNV 类型划分

CSCS 类一级分类指标湿润度  $K$  的计算公式为<sup>[28]</sup>:

$$K = r / (0.1 \times \Sigma\theta) \quad (1)$$

式中: 0.1 为调节系数;  $r$  为年降水量 (mm);  $\Sigma\theta$  为  $\geq 0$  °C 年积温 (°C); 对  $\Sigma\theta$  和  $r$  数据按照式 1 进行代数运算, 生成  $K$  数据。依据 CSCS 分类理论, 对  $\Sigma\theta$  和  $K$  数据进行逻辑运算, 当两者同时满足一定条件时将生成相应的 PNV 类型, 其代码、名称及英文名详见文献<sup>[28]</sup>。

为了便于研究中国 PNV 的时间、空间和面积变化及其对气候变化的响应, 本研究将 42 类 PNV 划分为 10 个类组, 具体的划分方法见文献<sup>[28]</sup>。

### 1.2.2 PNV 类组空间几何中心点、位移距离及位移方向计算

PNV 类型空间几何中心点、位移距离及位移方向的计算公式如下<sup>[32,33]</sup>:

$$\begin{cases} x_n(t) = \sum_{m=1}^{i_n(t)} \frac{S_{mn}(t) \cdot x_{mn}(t)}{s_n(t)} \\ y_n(t) = \sum_{m=1}^{i_n(t)} \frac{S_{mn}(t) \cdot y_{mn}(t)}{s_n(t)} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $t$  表示不同的时期;  $i_n(t)$  表示  $t$  时期 CSCS 划分的第  $n$  个 PNV 类组的斑块数 (个);  $S_{mn}(t)$  表示  $t$  时期第  $n$  个 PNV 类组的第  $m$  个斑块的面积 ( $\text{km}^2$ );  $s_n(t)$  表示  $t$  时期第  $n$  个 PNV 类组的总面积 ( $\text{km}^2$ );  $[x_{mn}(t), y_{mn}(t)]$  表示  $t$  时期第  $n$  个 PNV 类组的第  $m$  个斑块的中心点坐标;  $[x_n(t), y_n(t)]$  表示  $t$  时期第  $n$  个 PNV 类组的中心点坐标。

$$D_n = \sqrt{\{x_n(t+1) - x_n(t)\}^2 + \{y_n(t+1) - y_n(t)\}^2} \quad (3)$$

$$\theta_n = \arctg\left(\frac{y_n(t+1) - y_n(t)}{x_n(t+1) - x_n(t)}\right) \quad (4)$$

式中:  $D_n$  是第  $n$  个 PNV 类组在  $t$  时期至  $t+1$  时期内的移动距离;  $[x_n(t), y_n(t)]$  和  $[x_n(t+1), y_n(t+1)]$  分别为第  $n$  个 PNV 类组在  $t$  时期和  $t+1$  时期的中心点坐标;  $\theta_n$  表示第  $n$  个 PNV 类组在  $t$  至  $t+1$  时期内的移动方向;  $0^\circ$  定义为东,  $90^\circ$  定义为北,  $180^\circ$  定义为西,  $270^\circ$  定义为南。

### 1.2.3 PNV 类型划分的一致性检验

本研究将当前时期中国 PNV 分类图与柳小妮等<sup>[34,35]</sup>研制的中国 PNV 分类图进行对比分析, 利用 Kappa 系数检验其一致性, 其计算公式如下:

$$k = (p_o - p_e) / (1 - p_e) \quad (5)$$

式中：当 $k$ 值接近于0时，两者的一致性极差。当 $k$ 值等于1时，两者的一致性极好，完全相同。如果 $P_{ij}$ 是一幅地图中类组 $i$ 和另一幅地图中类组 $j$ 单元格数量总和的百分比，两幅地图的总体一致性比例 $p_o$ 计算公式如下：

$$p_o = \sum_{i=1}^m p_{ii} \quad (6)$$

式中： $m$ 为PNV类组数量（个）； $p_{ii}$ 为两幅地图中相同单元格所占比例；两幅地图的总体一致性比例期望值 $p_e$ 计算公式如式（7）：

$$p_e = \sum_{i=1}^m p_i p_i \quad (7)$$

PNV类组 $i$ 的个体Kappa统计方法如式（8）：

$$k_i = (p_{ii} - p_i p_i) / [(p_i + p_i) / 2 - p_i p_i] \quad (8)$$

本研究中一致性程度的临界值取值如表1所示。

## 2 结果分析

### 2.1 中国PNV时空分布格局及其变化

#### 2.1.1 时间分布格局及其变化

最后间冰期至未来2070s，CSCS将中国的PNV划分为39、37、38、40、40和40类，表明尽管不同的时期中国有着不同的气候模式，但是绝大部分的PNV类型能被划分。末次盛冰期由于全球处于冰期，气温较低，中国区域没有被划分出来的PNV类型最多（5个），其次为全新世中期和最后间冰期（4个和3个），当前时期、未来2050s和未来2070s有2个类型未被划分。VIA7

炎热极干热带荒漠类在6个时期均未被划分（表2）。除末次盛冰期未划分出热荒漠类组外（图1b），10个PNV类组在其余5个时期均被划分（图1）。李飞等<sup>[23-25]</sup>对中国干旱半干旱区、内蒙古和中国1961—2005年的PNV类型分别划分为10类、21类和41类，均比本研究多划分了1类（VIA6亚热带干亚热带荒漠类）。原因可能为其研究区域较小，气象站点更多，PNV类型的划分精度更高。Liang等<sup>[30]</sup>将青藏高原1951—2000年的PNV划分为冻原和高山草地、冷荒漠、半荒漠、斯泰普、温带湿润草地、温带森林、亚热带森林和热带森林8个类组，与本研究中当前时期（1950—2000年）该地区PNV类组完全一致。

#### 2.1.2 空间分布格局及其变化

最后间冰期至未来2070s，冻原和高山草地、冷荒漠和半荒漠类组主要分布在青藏高原、祁连山山脉、天山山脉、横断山脉、塔里木盆地、柴达木盆地、准噶尔盆地、内蒙古高原、昆仑山山脉、河套平原、华北平原、河西走廊和北山山地等寒冷干旱的地区。斯泰普、温带湿润草地和温带森林草地类组主要分布在黄土高原、内蒙古高原、关中平原、华北平原、东北平原，祁连山山脉、天山山脉、阿尔泰山山脉、大兴安岭山脉、青藏高原、横断山脉、云贵高原、秦岭山脉、太行山山脉、长白山山脉和台湾岛等温暖湿润的地区。热荒漠、亚热带森林草地、萨王纳和热带森林草地类组主要分布在吐鲁番盆

表1 Kappa系数中不同取值区间代表的一致性程度

Table 1 Degree of agreement represented by Kappa statistics

$k$	一致性程度
0~0.05	极差
0.05~0.20	非常差
0.20~0.40	差
0.40~0.55	一般
0.55~0.70	好
0.70~0.85	非常好
0.85~0.99	优秀
0.99~1.00	极好



表2 中国PNV类型时间分布格局及其变化

Table 2 Temporal pattern and its variation of potential natural vegetation classes in China

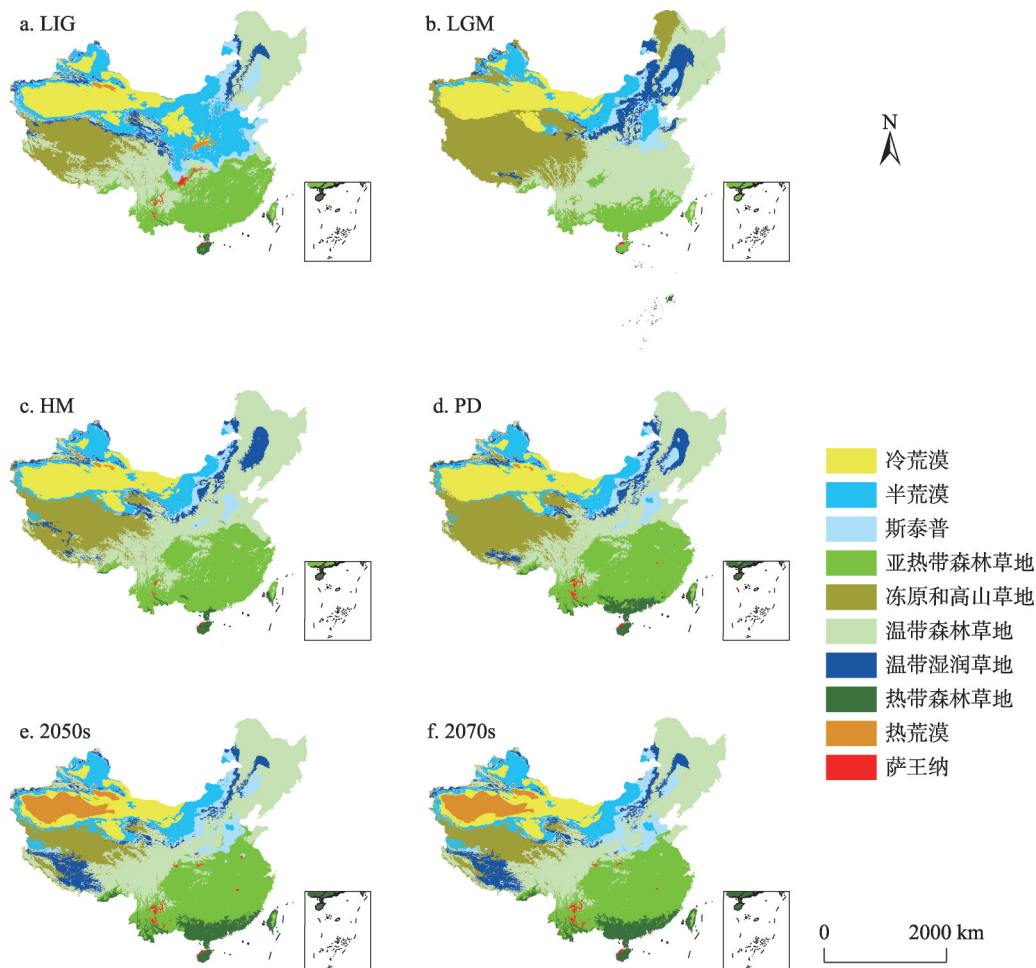
时期	已划分类型	未划分类型	数量/个
LIG	IIA2、IIIA3、IVA4、VA5、IB8、IIB9、IIIB10、IVB11、VB12、VIA6、VIIA7 VIB13、VIIB14、IC15、IIC16、IIIC17、IVC18、VC19、VIC20、VI- IC21、ID22、IID23、IIID24、IVD25、VD26、VID27、VIID28、 IE29、IIE30、IIIE31、IVE32、VE33、VIE34、VIIE35、IF36、IIF37、 IIIF38、IVF39、VVF40、VIF41、VIIF42	IA1、VIA6、VIIA7	39
LGM	IA1、IIA2、IIIA3、IVA4、IB8、IIB9、IIIB10、IVB11、VIB13、VA5、VIA6、VI- IC15、IIC16、IIIC17、IVC18、VC19、VIC20、VIIC21、ID22、IA7、VB12、VIIB14 IID23、IIID24、IVD25、VD26、VID27、VIID28、IE29、IIE30、 IIIE31、IVE32、VE33、VIE34、VIIE35、IF36、IIF37、IIIF38、 IVF39、VVF40、VIF41、VIIF42	IA1、VIA6、VI-	37
MH	IIA2、IIIA3、IVA4、VA5、IB8、IIB9、IIIB10、IVB11、VB12、VI- IB14、IC15、IIC16、IIIC17、IVC18、VC19、VIC20、VIIC21、IA7、VIB13 ID22、IID23、IIID24、IVD25、VD26、VID27、VIID28、IE29、 IIE30、IIIE31、IVE32、VE33、VIE34、VIIE35、IF36、IIF37、 IIIF38、IVF39、VVF40、VIF41、VIIF42	IA1、VIA6、VI-	38
PD	IA1、IIA2、IIIA3、IVA4、VA5、IB8、IIB9、IIIB10、IVB11、VB12、VIA6、VIIA7 VIB13、VIIB14、IC15、IIC16、IIIC17、IVC18、VC19、VIC20、VI- IC21、ID22、IID23、IIID24、IVD25、VD26、VID27、VIID28、 IE29、IIE30、IIIE31、IVE32、VE33、VIE34、VIIE35、IF36、IIF37、 IIIF38、IVF39、VVF40、VIF41、VIIF42	VIA6、VIIA7	40
2050s	IIA2、IIIA3、IVA4、VA5、VIA6、IB8、IIB9、IIIB10、IVB11、IA1、VIIA7 VB12、VIB13、VIIB14、IC15、IIC16、IIIC17、IVC18、VC19、 VIC20、VIIC21、ID22、IID23、IIID24、IVD25、VD26、VID27、VI- ID28、IE29、IIE30、IIIE31、IVE32、VE33、VIE34、VIIE35、IF36、 IIF37、IIIF38、IVF39、VVF40、VIF41、VIIF42	IA1、VIIA7	40
2070s	IIA2、IIIA3、IVA4、VA5、VIA6、IB8、IIB9、IIIB10、IVB11、IA1、VIIA7 VB12、VIB13、VIIB14、IC15、IIC16、IIIC17、IVC18、VC19、 VIC20、VIIC21、ID22、IID23、IIID24、IVD25、VD26、VID27、VI- ID28、IE29、IIE30、IIIE31、IVE32、VE33、VIE34、VIIE35、IF36、 IIF37、IIIF38、IVF39、VVF40、VIF41、VIIF42	IA1、VIIA7	40

注：LIG、LGM、MH、PD、2050s和2070s分别代表最后间冰期、末次盛冰期、全新世中期、当前时期、未来2050s和未来2070s六个时期，下同。

地、青藏高原、四川盆地、云贵高原、华北平原、长江中下游平原、岭南山地、海南岛和台湾岛等炎热潮湿的地区（图1）。

Sun等<sup>[36]</sup>通过研究孢粉指出全新世中期，黄土高原的主要自然景观为森林—草原。本研究中，全新世中期黄土高原的PNV类组为温带森林草地、温带湿润草地和斯泰普，其对应的自然景观也为森林—草原。张学珍等<sup>[37]</sup>复原了17世纪后期东北地区的PNV格局，结果表明，当时的主要PNV类型是森林和草地，森林主要分布在山区，草地主要分布在东北平原和内蒙古高原。本研究中当前时期，东北地区的PNV类组为斯泰普、温带森林草地和温带湿润草地，空间分布格局也与其基本一致。

最后间冰期至未来2070s，冻原和高山草地、温带湿润草地和温带森林草地类组在末



注：本图基于国家自然资源部标准地图服务网审图号为GS(2016)1584号的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 最后间冰期至未来2070s中国PNV类组空间分布格局及其变化

Fig. 1 Spatial distribution pattern and its variation of super-classes for potential natural vegetation from Last Interglacial to future 2070s in China

次盛冰期面积最大，冷荒漠和半荒漠类组在最后间冰期面积最大，斯泰普和萨王纳类组在未来2070s面积最大，其余三类组在未来2050s面积最大；末次盛冰期面积最小的类组有半荒漠、亚热带森林草地、萨王纳和热带森林草地，当前时期面积最小的类组为温带森林草地和热荒漠，冻原和高山草地、冷荒漠、斯泰普和温带湿润草地类组分别在未来2050s、未来2070s、全新世中期和最后间冰期面积最小。除冻原和高山草地、冷荒漠、半荒漠和温带森林草地类组呈现下降趋势外，其余类组均呈现上升趋势。温带森林草地在六个时期面积均最大，萨王纳面积均最小（当前时期除外），面积基本上为温带森林草地>冻原和高山草地≈亚热带森林草地>冷荒漠>半荒漠>斯泰普≈温带湿润草地>热带森林草地>热荒漠>萨王纳（表3）。

## 2.2 中国PNV时空分布格局演变

末次盛冰期至全新世中期，温带森林草地转变为亚热带森林草地的面积最大，为1167139.8 km<sup>2</sup>，占总变化面积的35.4%，主要分布在青藏高原南麓、云贵高原、四川盆

表3 最后间冰期至未来2070s中国PNV类组的分布面积及比例

Table 3 The distribution area and ratio of super-classes for potential natural vegetation from Last Interglacial to future 2070s in China

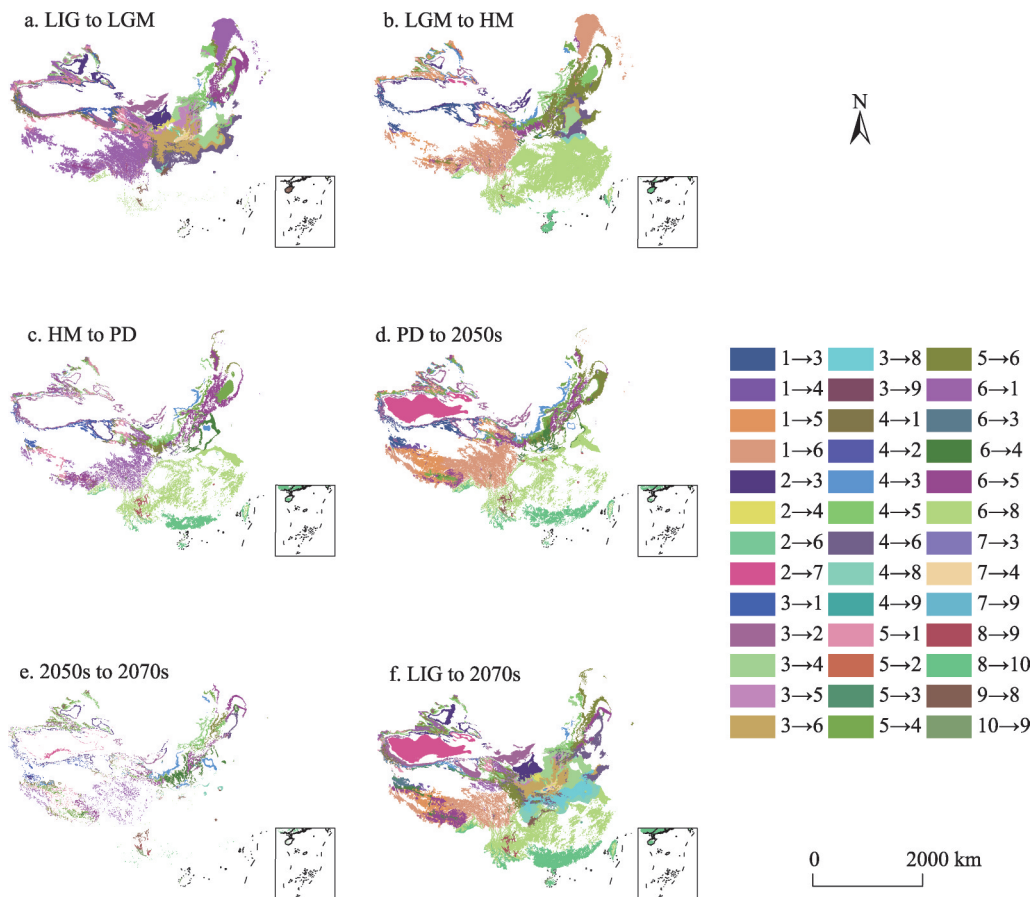
类组	LIG		LGM		MH		PD		2050s		2070s	
	面积/ 万 km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ 万 km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ 万 km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ 万 km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ 万 km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ 万 km <sup>2</sup>	比例/ %
冻原和高山草地	142.4	14.8	269.0	27.9	183.6	19.1	207.7	21.6	121.4	12.6	124.1	12.9
冷荒漠	140.2	14.6	133.1	13.8	128.9	13.4	130.3	13.5	94.3	9.8	94.1	9.8
半荒漠	177.6	18.4	78.5	8.1	84.6	8.8	78.8	8.2	91.4	9.5	93.1	9.7
斯泰普	73.4	7.6	53.8	5.6	41.9	4.3	53.1	5.5	74.0	7.7	76.2	7.9
温带湿润草地	41.2	4.3	74.9	7.8	62.5	6.5	58.1	6.0	59.4	6.2	61.5	6.4
温带森林草地	233.4	24.2	284.8	29.6	270.7	28.1	218.7	22.7	233.4	24.2	227.1	23.6
热荒漠	4.0	0.4	N/A	N/A	1.5	0.2	0.8	0.1	45.8	4.8	45.3	4.7
亚热带森林草地	146.4	15.2	67.9	7.0	183.7	19.1	196.6	20.4	208.8	21.7	207.5	21.5
萨王纳	1.4	0.1	0.4	0.0	0.6	0.1	1.3	0.1	2.0	0.2	2.0	0.2
热带森林草地	3.4	0.4	1	0.1	5.4	0.6	18.0	1.9	32.9	3.4	32.5	3.4
总计	963.4	100.0	963.4	100.0	963.4	100.0	963.4	100.0	963.4	100.0	963.4	100.0

注：表中N/A表示无。

地、华北平原南部、长江中下游平原和岭南山地北部（图2b）。其余依次为全新世中期至当前时期，温带森林草地转变为亚热带森林草地（264371.9 km<sup>2</sup>，22.8%）。最后间冰期至末次盛冰期，亚热带森林草地转变为温带森林草地（829232.5 km<sup>2</sup>，19.6%）。当前时期至未来2050s，冷荒漠转变为热荒漠（449743.1 km<sup>2</sup>，18.2%）。未来2050s至未来2070s，温带森林草地转变为斯泰普（44983.0 km<sup>2</sup>，14.8%）。最后间冰期至未来2070s，温带森林草地转变为亚热带森林草地（453638.3 km<sup>2</sup>，11.1%）。末次盛冰期至全新世中期，半荒漠转变为亚热带森林草地的面积最小，为1.4 km<sup>2</sup>，占总变化面积的0.00004%，主要零星分布在泰山北麓；其余时期间类组转换面积最小的均不超过2 km<sup>2</sup>，占比不超过0.00004%。类组间转换面积最大出现在末次盛冰期至全新世中期，表明该时间段的气候变化最为剧烈，陆地植被对气候变化的响应幅度最为宽广（图2）。

### 2.3 中国PNV时空格局对气候变化的响应

从图3b中可以看出，末次盛冰期气温最低， $\Sigma\theta < 1300$  °C的面积最大，分布在青藏高原、祁连山山脉、横断山脉和大兴安岭山脉，而 $\Sigma\theta > 8000$  °C的界限则南移至南沙群岛，与图1b中冻原和高山草地以及热带森林草地的分布界限相吻合。最后间冰期、当前时期、全新世中期、未来2050s和未来2070s 5个时期气温依次逐渐递增（图3m中柱形图表示不同时期中国区域的 $\geq 0$  °C年积温均值）， $\Sigma\theta < 1300$  °C的分布区域逐渐向海拔高度更高的青藏高原西北部移动，而其他 $\Sigma\theta$ 梯度则整体向纬度更高的北方移动，与图2中各类组的移动方向保持一致。而末次盛冰期湿润度 $K > 2.0$ 的分布区域最广，几乎占据了整个青藏高原、长江以南以及东北地区，随后随着温度的增加，而降水量增幅不大的情况下（图3n中柱形图表示不同时期中国区域的年降水量均值），其分布区域逐渐向南和向北退缩，原本为温带森林草地的区域逐渐演替为亚热带森林草地，热带森林草地和亚热带森林草地不断向西和向北扩张，而冻原和高山草地不断向西北方向缩减，与Wang等<sup>[9]</sup>和赵茂盛<sup>[21]</sup>等研究得出的结论一致。青藏高原地区，由于温度的增加，温带森林草地的大面积



注：图中数字1~10分别代表冻原和高山草地、冷荒漠、半荒漠、斯泰普、温带湿润草地、温带森林草地、热荒漠、亚热带森林草地、萨王纳和热带森林草地10个类组。

图2 最后间冰期至未来2070s中国PNV类组时空格局演变

Fig. 2 Spatio-temporal pattern evolution of super-classes for potential natural vegetation from Last Interglacial to future 2070s in China

增加导致冻原和高山草地的面积大幅度缩小。但并未出现热荒漠和萨王纳两个类组，与Liang等<sup>[30]</sup>的研究结果并不一致，可能原因为本文中采用的RCP 2.6情景假定CO<sub>2</sub>浓度的增加在2020年就达到峰值，随后逐年降低。所以本研究中至未来2070s时期，青藏高原地区温度的增加值不足3.54℃，未达到热荒漠和萨王纳的立地条件。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

##### 3.1.1 PNV的概念、分类体系及其局限性

CSCS全称为气候—土地—植物综合顺序分类法，其假设在一定的热湿条件下，陆地表层应该生长的地带性植被类型，其分类体系中并未包含人类活动影响因素。从本质上讲，其划分的植被类型为PNV类型，与受到人类活动影响的现实（现势）植被类型有一定的出入。定量研究中的PNV预测模型反映天然状态下的自然植被与所处环境间的一种定量关系，其能对PNV类型进行划分以及模拟PNV类型的地理分布格局<sup>[38,39]</sup>。PNV预测



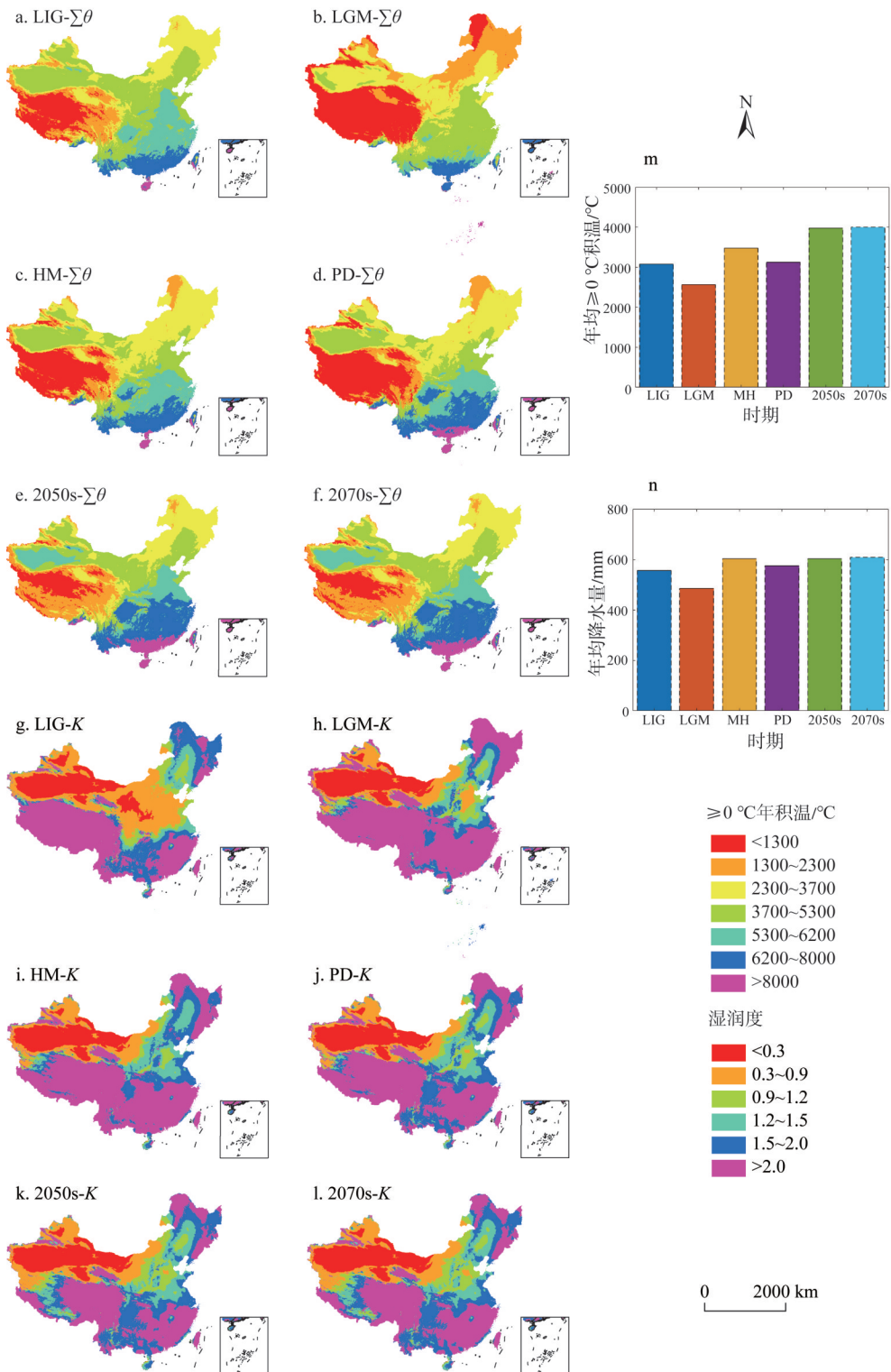


图3 最后间冰期至未来2070s中国 $\geq 0$  °C年积温 ( $\Sigma\theta$ ) 和湿润度 ( $K$ ) 时空分布格局

Fig. 3 Spatio-temporal distribution pattern of annual accumulated temperature  $\geq 0$  °C ( $\Sigma\theta$ ) and humidity ( $K$ ) from Last Interglacial to future 2070s in China

模型使用的方法有布尔模型法、参数模型法和机器学习模型法。CSCS本质上也是反映无人类活动干扰下自然植被与所处的立地条件之间的一种定量关系，其对类、亚类和型的划分采用的数学方法为布尔模型法，与PNV的概念及采用方法高度吻合，应当属于PNV范畴。故本研究认为PNV表达的是在某一研究时间段（点），在现有的自然环境条件下（包括气候和土地条件），立地应该存在的植被类型，其反映的是自然植被与其生存环境达到平衡后的一种演替终态。

目前，国际上对PNV类型的划分大部分采用生物气候模型、生物地理模型和生态系统过程模型。RF（由Ramankutty等<sup>[40]</sup>提出）将全球PNV划分为15类，草地植被类型2类（萨王纳和草地/斯泰普）。HLZ（Holdridge Life Zone）划分为38类，仅包含冷温带斯泰普1类草地（无萨王纳）<sup>[41,42]</sup>。MAPSS划分为35类，4类为草地植被类型（高草普列利、混合普列利、短草普列利和半荒漠草地）<sup>[43,44]</sup>。BIOME 4划分为28类，5类为草地植被类型（热带萨王纳、温带阔叶萨王纳、北方草原、热带草地和温带草地）<sup>[45]</sup>。IBIS划分为15类，2类为草地植被类型（萨王纳和草地/斯泰普）<sup>[46,47]</sup>。而CSCS则划分为42类，11类为草地植被类型。所以，CSCS对草地植被类型的划分较其他几种模型更为详细。无论采用何种分类模型，PNV始终代表的是一种理想状态下的自然植被分布状态，与受到人为干扰的现实（现势）自然植被有一定的差距，也是限制其在生产生活中被广泛应用的主要原因之一。

### 3.1.2 PNV类型划分精度

本文将当前时期中国PNV类组空间分布图（图4a）与柳小妮等<sup>[27]</sup>的研究成果（图4b）进行对比分析发现，柳小妮等<sup>[27]</sup>将中国PNV划分为41类，比本研究多划分了1类（VIA6亚热极干亚热带荒漠类），说明气象要素站点的数量和均匀分布与否以及空间插值方法仍然影响着气象数据的插值效果。但是，国内缺乏长时间序列的历史气象数据，无法进行不同地质年代的PNV类型划分，并且两者划分的PNV类组数量完全相同，Kappa系数为0.80，且PNV类组不一致的面积仅为40977.5 km<sup>2</sup>，占我国国土面积的0.4%，说明

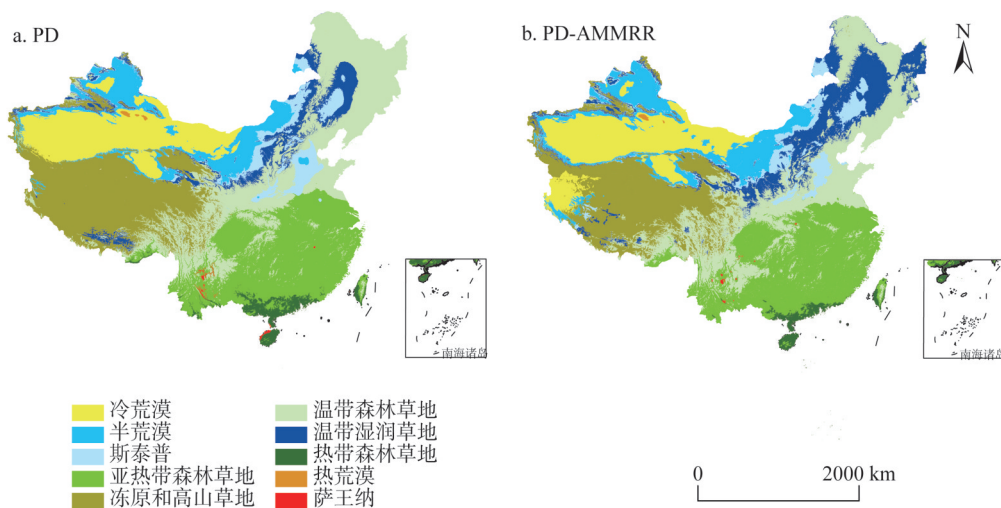


图4 当前时期两种不同数据来源的中国PNV类组空间分布对比

Fig. 4 Comparison of spatial distribution of super-classes for potential natural vegetation coming from two different data sources during Present-Day in China

两者具有很好的一致性。

### 3.1.3 PNV时空格局演变

最后间冰期至未来2070s, 萨王纳、亚热带森林草地和热带森林草地的空间几何中心均位于我国南方, 而其余七个类组的空间几何中心均位于我国的北方, 与我国南方气温高、降水量多以及北方气温低、降水量少的总体格局保持一致。萨王纳和温带湿润草地的位移方向为西南方; 斯泰普和热荒漠的位移方向为西方; 半荒漠的位移方向为西北方; 冷荒漠的位移方向为东方; 冻原和高山草地、热带森林草地、温带森林草地和亚热带森林草地的位移方向为北方, 与我国正面临气候变暖的趋势相吻合。位移距离最大为末次盛冰期至全新世中期的类组分别为斯泰普、半荒漠、亚热带森林草地和热带森林草地; 位移距离最大为当前时期至未来2050s的类组为热荒漠、冷荒漠和温带湿润草地; 位移距离最大为最后间冰期至末次盛冰期的类组为冻原和高山草地、温带森林草地和萨王纳, 表明气候变化愈剧烈, 类组的位移距离越大(图5)。由于RCP 2.6情景预测温室气体在2010—2020年达到峰值, 随后缓慢下降, 而本文中未来2050s和2070s两个时期均采用RCP 2.6情景预测的气候数据, 给PNV变化预测带来了一定的不确定性, 有可能低估了当前至未来2050s和2050s至2070s两个时间段PNV类组的位移距离。

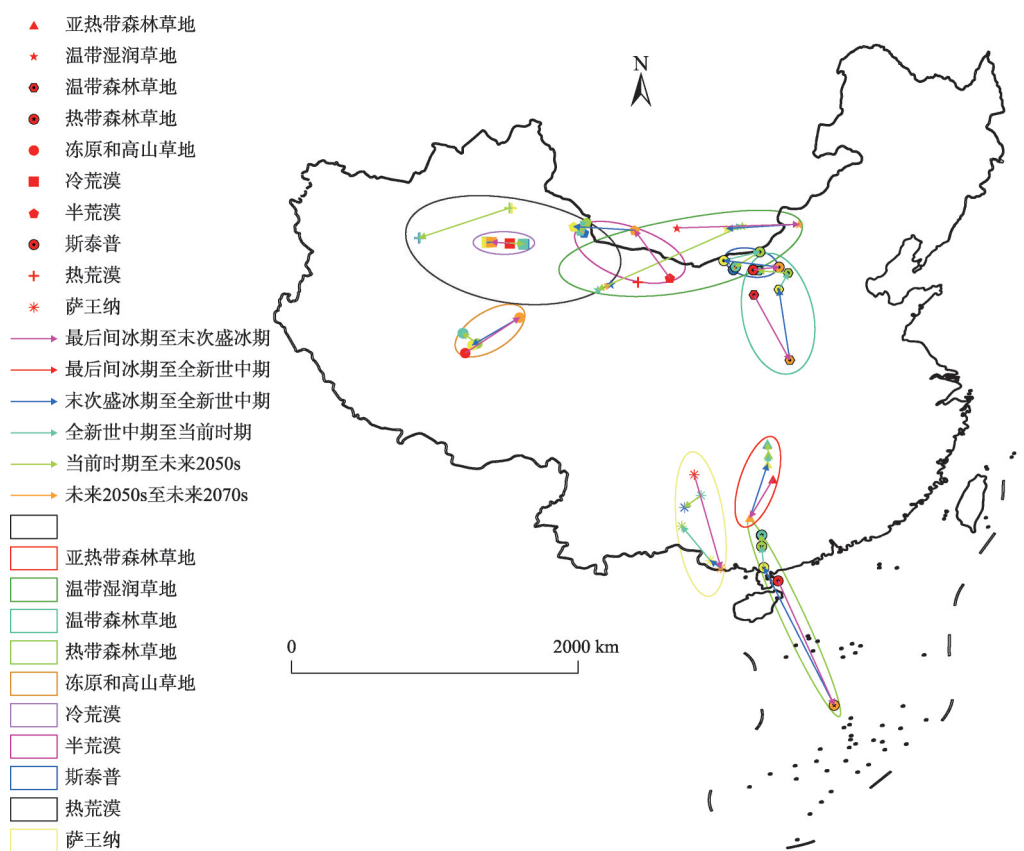


图5 中国PNV类组在不同时期的空间几何中心、位移距离和位移方向

Fig. 5 Geometrical center, shifting distance and direction of super-classes for potential natural vegetation during different periods in China

### 3.2 结论

(1) 最后间冰期至未来2070s, CSCS将中国的PNV分别划分为39、37、38、40、40和40类。VIIA7炎热极干热带荒漠类在6个时期均未被划分。除末次盛冰期未划分出热带荒漠类组外, 10个PNV类组在其余5个时期均被划分。

(2) 冻原和高山草地等寒冷干旱型类组主要分布在西北地区, 斯泰普等温暖湿润型类组主要分布在中东部地区, 萨王纳等炎热潮湿型类组主要分布在南方地区。各类组的面积大小基本为温带森林草地>冻原和高山草地~亚热带森林草地>冷荒漠>半荒漠>斯泰普~温带湿润草地>热带森林草地>热荒漠>萨王纳。除冻原和高山草地、冷荒漠、半荒漠和温带森林草地类组呈现下降趋势外, 其余均为上升趋势。

(3) 末次盛冰期至全新世中期, 温带森林草地转变为亚热带森林草地的面积最大, 为1167139.8 km<sup>2</sup>, 占总变化面积的35.4%, 表明该时间段的气候变化最为剧烈, 陆地植被对气候变化的响应幅度最为宽广。

(4) 最后间冰期至未来2070s, 随着温度的增加, 森林类组逐渐向纬度更高的北方和海拔高度更高的青藏高原移动, 草地类组的面积会急剧减少, 在生态环境极其脆弱的青藏高原表现最为明显。气候变化越剧烈, PNV类组的几何分布中心、位移方向和位移距离就会出现更大的偏移量。

(5) CSCS理论体系中并未包含人类活动影响因素, 且能对长时间序列的自然植被进行分类划分, 本质上属于PNV, 其较RF等模型对草地植被有更加详细的类型划分。

### 参考文献(References):

- [1] KELLY A, POWELL D C, RIGGS R A. Predicting potential natural vegetation in an interior northwest landscape using classification tree modeling and a GIS. *Western Journal of Applied Forestry*, 2005, 20(2): 117-127.
- [2] ROSATI L, MARIGNANI M, BLASI C. A gap analysis comparing natura 2000 vs national protected area network with potential natural vegetation. *Community Ecology*, 2008, 9(2): 147-154.
- [3] AGUILAR M J A, GONZALEZ-GONZALEZ R, GARZON-MACHADO V, et al. Actual and potential natural vegetation on the Canary Islands and its conservation status. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19(11): 3089-3140.
- [4] THONICKE K, CRAMER W. Long-term trends in vegetation dynamics and forest fires in Brandenburg (Germany) under a changing climate. *Natural Hazards*, 2006, 38(1-2): 283-300.
- [5] HICKLER T, VOHLAND K, FEEHAN J, et al. Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(1): 50-63.
- [6] WANG H, NI J, PRENTICE I C. Sensitivity of potential natural vegetation in China to projected changes in temperature, precipitation and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Regional Environmental Change*, 2011, 11(3): 715-727.
- [7] TÜXEN R. Die heutige potentielle natürliche vegetation als gegenstand der vegetationskartierung. *Angewandte Pflanzensoziologie (Stolzenau)*, 1956, 13: 5-42.
- [8] CARRIÓN J S, FERNANDEZ S. The survival of the 'natural potential vegetation' concept (or the power of tradition). *Journal of Biogeography*, 2009, 36(12): 2202-2203.
- [9] FARRIS E, FILIBECK G, MARIGNANI M, et al. The power of potential natural vegetation (and of spatial-temporal scale): A response to Carrión & Fernandez (2009). *Journal of Biogeography*, 2010, 37(11): 2211-2213.
- [10] LOIDI J, ARCO M, PAZ P L P, et al. Understanding properly the 'potential natural vegetation' concept. *Journal of Biogeography*, 2010, 37(11): 2209-2211.
- [11] CHIARUCCI A, ARAÚJO M B, DECOCQ G, et al. The concept of potential natural vegetation: An epitaph?. *Journal of Vegetation Science*, 2010, 21(6): 1172-1178.
- [12] SOMODI I, MOLNÁR Z, EWALD J. Towards a more transparent use of the potential natural vegetation concept-an answer to Chiarucci et al. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(3): 590-595.
- [13] CARRIÓN J S. The concepts of potential natural vegetation (PNV) and other abstraction (trying to pick up fish with wet



- hands). *Journal of Biogeography*, 2010, 37(11): 2213-2215.
- [14] ZAMPIERI M, LIONELLO P. Simple statistical approach for computing land cover types and potential natural vegetation. *Climate Research*, 2010, 41(41): 205-220.
- [15] FISCHER H S, WINTER S, LOHBERGER E, et al. Improving transboundary maps of potential natural vegetation using statistical modeling based on environmental predictors. *Folia Geobotanica*, 2013, 48(2): 115-135.
- [16] REGER B, HÄRING T, EWALD J. The TRM model of potential natural vegetation in mountain forests. *Folia Geobotanica*, 2014, 49(3): 337-359.
- [17] JACKSON S T. Natural, potential and actual vegetation in North America. *Journal of Vegetation Science*, 2013, 24(4): 772-776.
- [18] 赵传燕, 冯兆东, 南忠仁, 等. 黄土高原祖厉河流域潜在植被分布模拟研究. *地理学报*, 2007, 62(1): 52-61. [ZHAO C Y, FENG Z D, NAN Z R, et al. Modelling of potential vegetation in Zulihe river watershed of the west-central Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(1): 52-61.]
- [19] LIU H M, WANG L X, YANG J, et al. Predictive modeling of the potential natural vegetation pattern in Northeast China. *Ecological Research*, 2009, 24(6): 1313-1321.
- [20] YUAN Q Z, ZHAO D S, WU S H, et al. Validation of the integrated biosphere simulator in simulating the potential natural vegetation map of China. *Ecological Research*, 2011, 26(5): 917-929.
- [21] 赵茂盛, NEILSON R P, 延晓冬, 等. 气候变化对中国植被可能影响的模拟. *地理学报*, 2002, 57(1): 28-38. [ZHAO M S, NEILSON R P, YAN X D, et al. Modelling the vegetation of China under changing climate. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(1): 28-38.]
- [22] LIANG T G, FENG Q S, CAO J J, et al. Changes in global potential vegetation distributions from 1911 to 2000 as simulated by the comprehensive sequential classification system approach. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(11): 1298-1310.
- [23] 李飞, 赵军, 赵传燕, 等. 中国西北干旱区潜在植被模拟与动态变化分析. *草业学报*, 2011, 20(4): 42-50. [LI F, ZHAO J, ZHAO C Y, et al. Simulating and analyzing dynamic changes of potential vegetation in arid areas of Northwest China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(4): 42-50.]
- [24] 李飞, 赵军, 赵传燕, 等. 中国干旱半干旱区潜在植被演替. *生态学报*, 2011, 31(3): 689-697. [LI F, ZHAO J, ZHAO C Y, et al. Succession of potential vegetation in arid and semi-arid area of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3): 689-697.]
- [25] 赵军, 师银芳, 王大为. 基于 IOCS 的内蒙古潜在植被 NPP 空间分布特征研究. *自然资源学报*, 2012, 27(11): 1870-1880. [ZHAO J, SHI Y F, WANG D W. Analysis of spatial distribution features of potential vegetation NPP in Inner Mongolia based on the IOCS. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(11): 1870-1880.]
- [26] 赵军. 天然草地生态信息图谱与草业生态信息学的理论与实践研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2007. [ZHAO J. The study on theory and practice of rangeland eco-information maps and pratacultural eco-informatics. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2007.]
- [27] 柳小妮, 郭婧, 任正超, 等. 基于气象要素空间分布模拟优化的中国草地综合顺序分类. *农业工程学报*, 2012, 28(9): 222-229. [LIU X N, GUO J, REN Z C, et al. Chinese rangeland CSCS classification based on optimal simulation for spatial distribution of meteorological factors. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(9): 222-229.]
- [28] 任继周, 梁天刚, 林慧龙, 等. 草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜势研究. *草业学报*, 2011, 20(2): 1-22. [REN J Z, LIANG T G, LIN H L, et al. Study on grassland's responses to global climate change and its carbon sequestration potentials. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(2): 1-22.]
- [29] FENG Q S, LIANG T G, HUANG X D, et al. Characteristics of global potential natural vegetation distribution from 1911 to 2000 based on comprehensive sequential classification system approach. *Grassland Science*, 2013, 59(2): 87-99.
- [30] LIANG T G, FENG Q S, YU H, et al. Dynamics of natural vegetation on the Tibetan Plateau from past to future using a comprehensive and sequential classification system and remote sensing data. *Grassland Science*, 2012, 58(4): 208-220.
- [31] 梁天刚, 冯琦胜, 黄晓东, 等. 草原综合顺序分类系统研究进展. *草业学报*, 2011, 20(5): 252-258. [LIANG T G, FENG Q S, HUANG X D, et al. Review in the study of comprehensive sequential classification system of grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(5): 252-258.]
- [32] YUE T X, FAN Z M, CHEN C F, et al. Surface modelling of global terrestrial ecosystems under three climate change scenarios. *Ecological Modelling*, 2011, 222(14): 2342-2361.
- [33] HART J F. Central tendency in areal distributions. *Economic Geography*, 1954, 30(1): 48-59.

- [34] MONSERUD R A, LEEMANS R. Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. *Ecological Modelling*, 1992, 62(4): 275-293.
- [35] PRENTICE I C, CRAMER W, HARRISON S P, et al. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 1992, 19(2): 117-134.
- [36] SUN A Z, FENG Z D, MA Y Z. Vegetation and environmental changes in western Chinese Loess Plateau since 13.0 ka BP. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(2): 177-192.
- [37] 张学珍, 王维强, 方修琦, 等. 中国东北地区 17 世纪后期的自然植被格局. *地理科学*, 2011, 31(2): 184-189. [ZHANG X Z, WANG W Q, FANG X Q, et al. Natural vegetation pattern over Northeast China in late 17th century. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(2): 184-189.]
- [38] MARTÍNEZ-TABERNER A, RUIZ-PEREZ M, MESTRE I, et al. Prediction of potential submerged vegetation in a silt-ed coastal marsh, Albufera of Majorea, Balearic Islands. *Journal of Environmental Management*, 1992, 35(1): 1-12.
- [39] PLAMER A R, STADEN J M V. Predicting the distribution of plant communities using annual rainfall and elevation: An example from Southern Africa. *Journal of Vegetation Science*, 1992, 3(2): 261-266.
- [40] RAMANKUTTY N, FOLEY J A. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 997-1027.
- [41] HOLDRIDGE L R. Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*, 1947, 105(2727): 367-368.
- [42] HOLDRIDGE L R, GRENKE W C, HATHEWAY W H, et al. *Forest Environments in Tropical Life Zones: A Pilot Study*. New York: Pergamon Press, 1971: 1-747.
- [43] NEILSON R P. A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance. *Ecological Applications*, 1995, 5(2): 362-385.
- [44] NEILSON R P, MARKS D. A global perspective of regional vegetation and hydrological sensitivities from climate change. *Journal of Vegetation Science*, 1994, 5(5): 715-730.
- [45] KAPLAN J O. *Geophysical Application of Vegetation Modeling*. Lund: Lund University, 2001.
- [46] FOLEY J A, PRENTICE I C, RAMANKUTTY N, et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4): 603-628.
- [47] KUCHARIK C J, FOLEY J A, DELIRE C, et al. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 795-825.

## Spatio-temporal distribution pattern of potential natural vegetation and its response to climate change from Last Interglacial to future 2070s in China

REN Zheng-chao<sup>1,2</sup>, ZHU Hua-zhong<sup>3</sup>, SHI Hua<sup>4</sup>, LIU Xiao-ni<sup>5</sup>

(1. College of Finance and Economics, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Research Center of Ecological Construction and Environmental Conservation in Gansu Province, Lanzhou 730070, China; 3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, ASRC Federal InuTeq, Contractor to the U.S. Geological Survey (USGS), Sioux Falls 57198, USA; 5. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Regarded as the final evolutionary status with its standing environment, potential natural vegetation plays a key role in ecological reconstruction, design of natural reserve, and development of agriculture and livestock farming. Based on the Comprehensive and Sequential

Classification System model, in combination of climatic datasets containing temperature and precipitation in periods of Last Interglacial, Last Glacial Maximum, Mid Holocene, Present-Day, and project climate in the 2050s and 2070s, the spatio-temporal distribution pattern of potential natural vegetation in China and its response to climate change during the six periods were analyzed. The results showed that: (1) 39, 37, 38, 40, 40, 40 and 40 classes, and 10 super-classes were classified for potential natural vegetation by CSCS model from Last Inter-Glacial to future 2070s in China. (2) The frigid-arid super-classes were mainly distributed in northwest China, but warm-humid super-classes and tropical-perhumid super-classes appeared in the central-east China and southern China, respectively. The area was following a descending order: temperate zonal forest steppe, tundra and alpine steppe, sub-tropical zonal forest steppe, frigid desert, semi desert, steppe, temperate zonal humid grassland, tropical zonal forest steppe, warm desert and savanna during the six periods. Tundra and alpine steppe, frigid desert, semi desert, and temperate zonal forest steppe presented a decreasing trend, but the other super-classes showed an increasing trend. (3) The conversion of temperate zonal forest steppe to sub-tropical zonal forest steppe had the biggest area, accounting for 35.4% of total changed area, which meant that the climate shifted sharply and the response of terrestrial vegetation to climate change was sensitive during the period from Last Glacial Maximum to Mid Holocene. (4) CSCS, with more detailed features for classifying grassland vegetation than other models such as RT, excluding the human activity from its classification system, could simulate the long-time series succession of potential natural vegetation. (5) With the global warming, forest shifted to northern China and Tibet with much higher latitude and elevation. The geometrical center, shifting direction and distance of super-classes revealed more offset with more serious impact of climate change. The results further clarified the concept of potential natural vegetation, explored the impact mechanism of climatic change on succession of potential natural vegetation, and enriched the research contents of potential natural vegetation, which could be taken as a reference for construction of regional natural reserve, ecological reconstruction and promotion for agriculture and animal husbandry.

**Keywords:** potential natural vegetation; CSCS; spatio-temporal pattern; climate change; vegetation classification system