

中国典型山区农业水土资源匹配格局变化 ——以太行山区、横断山区、黔桂喀斯特山区为例

王佳月^{1,2}, 辛良杰¹, 戴尔阜¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所/陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083)

摘要: 为了解中国典型山区农业水土资源分布的匹配程度及其格局变化, 研究以区域内单位面积耕地拥有的农业水资源量刻画太行山区、横断山区和黔桂喀斯特山区农业水土资源的时空匹配情况。结果表明: ① 三大山区耕地分布的集中程度较高。太行山区的耕地主要分布在河北境内的北段地区和山西境内的南段地区, 横断山区的耕地主要分布在南段地区, 喀斯特山区的耕地分布呈现“南北多中部少”的格局。② 三大山区农业水资源的分布及变化都主要集中在低海拔地区。太行山区的农业水资源主要分布在山西、河南段, 横断山区的农业水资源主要分布在四川境内, 喀斯特山区的农业水资源较均匀地分布在广西和贵州境内。③ 太行山区农业水土资源匹配程度较差, 横断山区、喀斯特山区农业水土资源匹配程度较好。2000—2015年间, 太行山区中部、横断山区东部、喀斯特山区南部地区的农业水土匹配程度有变好趋势, 而太行山区南部、横断山区西南部、喀斯特山区北部地区的农业水土匹配程度有变差趋势。研究时段内, 太行山区的水田转旱地情况突出, 太行山区也是三大山区中农业水土资源匹配程度最差的, 应该关注太行山区的用水压力, 重视农田水利设施维护和农田灌溉水有效利用。

关键词: 农业水土资源; 匹配格局; 时空变化; 太行山区; 横断山区; 黔桂喀斯特山区

DOI: 10.11821/dlyj020190690

1 引言

中国山地国土空间比例高的基本国情给国家建设与发展及生态保护带来了诸多挑战^[1], 而水资源和土地资源是研究山地空间生态安全和可持续发展的重要要素, 农业水土资源不匹配会严重制约农业的发展^[2]。中国广大山区地区农业生产条件相对较差, 生态相对脆弱, 农业水土资源不匹配会带来水土流失^[3]、山地灾害^[4]等威胁, 山区生态破坏, 农业生产环境恶化, 不仅威胁山区农业的发展和山区居民的生态安全, 而且构成对全国江河流域的危害^[5]。近年来, 随着中国城镇化的快速发展, 山区的农业水土资源也存在被挤占现象, 研究山区农业水土资源的空间分布及匹配格局的变化, 对优化配置山区农业水土资源、提高农业水土资源利用效率、协调农业生产与生态环境保护、维持山区农业的可持续发展具有指导意义^[6]。目前, 对山区水资源的研究主要集中在水资源时空变化^[7]、水资源承载力^[8]和水资源可持续利用^[9]方面。对山区土地资源的研究主要集中在土地资源的时空变化^[10]、土地资源承载力^[11]、土壤侵蚀和土地退化^[12,13]等问题。已有的研究

收稿日期: 2019-08-15; 修订日期: 2019-12-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2015CB452700)

作者简介: 王佳月(1992-), 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 主要从事土地利用变化与效应研究。

E-mail: wangjy.16b@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 辛良杰(1978-), 山东潍坊人, 博士, 副研究员, 主要从事土地利用变化与效应研究。

E-mail: xinlj@igsnrr.ac.cn

主要探讨了水、土单要素对水土资源优化配置和山区发展的影响^[1], 仍缺乏针对山区的农业水土要素匹配研究。现有对农业水土资源匹配的研究, 主要采用单位耕地面积水资源量法和基尼系数法, 其中, 单位耕地面积水资源量法应用较多^[4], 且更能直观的反映出区域内农业水土资源禀赋的匹配程度, 因此, 采用构建农业水土资源匹配系数来反映单位耕地面积水资源量的方法, 针对山区开展农业水土要素匹配的研究。

太行山脉是中国地形第二阶梯的东缘, 也是京津冀地区的重要生态屏障, 区域内垦殖率高, 农业用水量高, 地下水超采严重, 带来了水土流失、地面沉降等一系列负面影响^[15], 属于山区水土资源分布不典型的典型地区。横断山脉是中国最长、最宽和最典型的南北向山系群^[16], 由于其特殊的走向, 这里成为地理、水文等诸多领域研究的重点山区。同时, 这里的耕地资源分布有限, 林、草地资源丰富, 随着“天然林保护工程”“退耕还林还草工程”的实施, 横断山区成为生态环境建设的重点地区。横断山区的水资源丰富, 但农田灌溉水有效利用系数很低, 区域内2015年平均的系数仅为0.45, 低于全国平均水平0.54, 其可供农业利用的水资源量也有待评估。黔桂喀斯特山区水土流失严重, 形成了石漠化脆弱生态系统, 灾变承受能力低, 是中国典型的生态环境脆弱地区^[17,18]。同时, 喀斯特山区水资源总量较为丰富, 但农业用水中存在严重的工程性缺水问题^[19], 应对其农业水土资源的实际匹配程度进行评价, 因地制宜地为当地农业水利工程建设提供理论参考。因此, 本研究选择中国易受水分快速胁迫的太行山区、横断山区、黔桂喀斯特山区3个中国典型山地^[1], 引入农业水土资源匹配系数, 由三大山区的土地资源、水资源的时空变化入手, 用区域内单位面积耕地上拥有的农业水资源量来描述该区域农业水土资源的时空匹配的情况, 以期为中国山区农业水土资源匹配研究提供案例实践。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 水土资源匹配系数计算

研究引入农业水土资源匹配系数的概念^[20]来描述某区域内农业水土资源的时空匹配情况。本研究中的水土资源匹配系数定义为某区域内单位面积耕地可拥有的农业水资源量, 系数值越高, 表示区域内农业水资源与耕地资源分布的一致性越高。水土资源匹配系数的计算以市域为基本单元, 计算公式为:

$$M_{it} = W_{it} \times \alpha_i / L_{it} \quad (1)$$

式中: M_{it} 为 i 市在 t 年的农业水土资源匹配系数, 单位为 m^3/hm^2 ; W_{it} 为 i 市在 t 年的水资源总量, 单位为 m^3 ; L_{it} 为 i 市在 t 年的耕地面积, 单位为 hm^2 ; α_i 为 i 市研究时段内, 多年总用水中 (农业用水、工业用水、生活用水、环境用水) 农业用水比例的平均值。

计算三大山区区域内各市域水土资源匹配系数的均值, 得到三大山区的水土资源匹配系数:

$$M_{jt}' = \sum_{i=1}^n M_{it} / n \quad (2)$$

式中: M_{jt}' 为 j 山区区域在 t 年的农业水土资源匹配系数; M_{it} 为 j 山区区域内 i 市在 t 年的农业水土资源匹配系数; n 为 j 山区区域内市域的数量。

2.2 数据来源

2.2.1 土地利用数据 研究数据来自国家重点基础研究项目“山区国土空间功能优化与调控对策”, 包括1990年、2000年、2010年、2015年太行山区、横断山区、黔桂喀斯特山区1:10万土地利用数据。主要土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、建设用地 (城乡、工矿、居民用地) 和未利用地。

2.2.2 水资源数据 数据来自2000—2005年和2012—2017年的《北京市水资源年报》《河北省水资源年报》《山西省水资源年报》《河南省水资源年报》《广西自治区水资源年报》《四川省水资源年报》《贵州省水资源年报》《云南省水资源年报》《西藏自治区水资源年报》。指标包括各市水资源总量、各市用水量、各市农业用水量等。

2.2.3 行政区划数据 数据包括太行山区、横断山区、黔桂喀斯特山区范围内的县级、市级和省级区划数据。其中,太行山区纵跨北京、河北、山西、河南4个省市,涉及21个地级市,101个县;横断山区纵跨四川、云南、西藏3个省区,涉及15个地级市,99个县;黔桂喀斯特山区纵跨贵州、广西2个省区,涉及16个地级市,97个县。

2.2.4 地形数据 使用90 m空间分辨率的SRTM数字高程模型(DEM)数据(<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>)作为基础的地形数据,再由ArcGIS 10.0软件生成坡度、坡向数据。

3 结果分析

3.1 中国三大山区耕地资源分布时空变化

从三大山区的土地利用类型来看,林地、草地、耕地是最主要的地类。太行山区以耕地、林地、草地为主,分别占整个地区面积的37.75%、27.58%和24.07%。横断山区以林地、草地为主,分别占44.79%和42.54%,耕地仅占7.72%。黔桂喀斯特山区以林地、耕地为主,分别占57.66%和25.57%,草地占13.97%。耕地主要以旱地为主,黔桂喀斯特山区的耕地中61.56%为旱地,横断山区的耕地中79.95%为旱地,太行山区的耕地中99.79%为旱地。从各地类的时间变化上看,太行山区的突出特征为水田转旱地,横断山区的特征为耕地转建设用地,黔桂喀斯特山区的特征为未利用地转建设用地(表1、表2)。1990—2015年,太行山区的建设用地增加了22.67%,草地和耕地分别减少了5.66%和2.11%,耕地中水田减少明显,减少了79.50%。增加的建设用地主要来源于耕地,一是由于人口增长和城市化发展,二是由于空心村外延扩展占用了外围大量的耕地^[21]。草地主要转变为旱地和林地,而68.95%的水田都变为了旱地。横断山区、喀斯特山区的建设用地和水域增加明显,分别增加了121.64%、10.24%和47.32%、27.18%,横断山区的建设用地、水域面积增加主要来源于耕地,喀斯特山区主要来源于未利用地。

从各地类的转移矩阵来看(表2),太行山区水田、水域和农村居民点的变化最剧烈,1990—2015年,水田转成旱地的情况十分突出,水田以每年17.12 km²的速度转变为旱地,可以看出太行山区农业水资源的紧缺。横断山区水域、农村居民点和城镇用地的变化最剧烈,31.23%的水域转变为了林、草地,5.56%的农村居民点和7.69%的城镇用地转变为了草地。黔桂喀斯特山区未利用地、其他建设用地(厂矿、交通道路等用地)和草地的变化最剧烈,33.34%的未利用地转变为了水域和其他建设用地,15.63%的其他建设用地转变为了水田和城镇用地,5.87%的草地转变为了林地。

从2015年耕地县域尺度的空间分布来看(图1),山区耕地的空间分布集中程度高,太行山区的耕地主要集中在河北境内的北段地区和山西境内的南段地区,横断山区的耕地主要集中在南段地区,黔桂喀斯特山区的耕地分布呈现“南北多中部少”的格局。从1990—2015年耕地的空间变化上看,太行山中部和东南地区(河北省曲阳县、武安市、平山县、磁县、元氏县,山西省盂县等)耕地减少明显。太行山区北部的山西省定襄县、河北省顺平县、蔚县、唐县耕地增加明显。横断山区的耕地减少主要集中在南部地区,如云南省巧家县、四川省昭觉县等。耕地增加主要发生在中部、南部地区,如云南

表1 中国三大山区各地类面积统计

Tab. 1 Land use area statistics among three mountainous areas in China

区域	地类	1990年 (km ²)	2000年 (km ²)	2010年 (km ²)	2015年 (km ²)	1990—2015年 变化率(%)
太行山区	耕地	61909.96	61756.57	62125.08	60603.14	-2.11
	水田	633.23	588.80	317.84	129.80	-79.50
	旱地	61276.73	61167.77	61807.24	60473.34	-1.31
	林地	43345.12	43316.76	43269.96	44275.32	2.15
	草地	40965.97	40179.16	39549.62	38646.96	-5.66
	水域	2558.48	2453.72	2256.36	2558.98	0.02
	城乡、工矿、居民用地	11651.38	12721.85	13105.17	14292.87	22.67
	未利用土地	124.30	127.15	249.02	177.93	43.15
横断山区	耕地	34546.30	34311.16	34084.66	34639.46	0.27
	水田	7261.07	7297.91	7029.55	6943.50	-4.37
	旱地	27285.23	27013.26	27055.11	27695.97	1.51
	林地	202194.44	201337.67	206873.53	201077.71	-0.55
	草地	190435.10	191591.54	185550.21	190961.44	0.28
	水域	3160.39	2765.99	3657.63	3483.98	10.24
	城乡、工矿、居民用地	806.60	904.36	1324.53	1787.75	121.64
	未利用土地	17773.07	18005.18	17425.46	16964.41	-4.55
黔桂喀斯特山区	耕地	66409.85	66472.56	65677.86	65425.43	-1.48
	水田	26111.97	25999.89	25641.59	25152.24	-3.68
	旱地	40297.88	40472.67	40036.27	40273.19	-0.06
	林地	146496.65	146246.80	147332.43	147534.20	0.71
	草地	37784.15	37686.00	35955.28	35735.17	-5.42
	水域	2195.87	2268.01	2648.86	2792.72	27.18
	城乡、工矿、居民用地	2946.67	3159.83	4214.31	4341.11	47.32
	未利用土地	33.34	33.34	37.80	37.90	13.67

省宁蒗县，四川省木里县等。黔桂喀斯特山区的耕地减少主要集中在其南部的广西境内，如环江县、隆安县，耕地增加主要发生在北部的贵州境内，如扶绥县、织金县等。

从三大山区的地形条件看（表3），横断山区的平均高程最高（3307.90 m），平均坡度最大（9.86°）；太行山区的平均高程为927.17 m，平均坡度为3.75°；喀斯特山区的平均高程为748.98 m，平均坡度为3.19°。从耕地在不同高程、坡度的分布情况看，横断山区的耕地分布在194~5816 m高程范围、0~54.67坡度范围内，耕地的平均高程、坡度最高；喀斯特山区的耕地主要分布在-23~2613 m高程范围、0~47.47坡度范围内；太行山区的耕地主要分布在5~2256 m高程范围、0~18.12°坡度范围内。具体来看，太行山区耕地主要集中在1500 m以下，1990—2015年期间，耕地变化剧烈区主要集中在800 m以下；横断山区耕地主要集中在4000 m以下，耕地变化剧烈区主要集中在2500 m以下；黔桂喀斯特山区耕地主要集中在2000 m以下，耕地变化剧烈区主要集中在200 m以下。

从耕地在不同坡向、不同高程的分布看（图2），三大山区中，南（阳坡）、北坡（阴坡）的耕地分布特征相似，南坡的耕地分布总体上高于北坡。其中，太行山区耕地在各高程区间分布的集中程度最高，太行山区内的耕地分布随高程增加表现为先减少再增加随后再减少的特点，耕地分布的峰值对应的高程范围分别为0~100 m和900~1000 m。横断山区内的耕地在不同高程分区内的分布最广，耕地的分布随着高程的增加表现为先增加再减少随后再增加再减少的特点，耕地分布的峰值对应的高程范围分别为1800~

表2 中国三大山区各地类转移矩阵

Tab. 2 Land use transfer matrix among three mountainous areas in China

单位: %

区域	1990年	2015年								
		旱地	林地	草地	水域	城镇用地	农村居民点	其他建设用地	未利用地	水田
太行山区	水田	15.38	68.59	1.28	0.00	6.41	3.85	1.92	1.28	1.28
	旱地	0.02	93.61	0.17	0.61	0.60	1.39	1.81	1.75	0.04
	林地	0.02	0.44	98.74	0.35	0.13	0.01	0.07	0.23	0.01
	草地	0.00	3.54	2.90	92.80	0.10	0.06	0.17	0.43	0.01
	水域	0.15	16.05	1.08	1.39	77.47	0.62	0.62	1.39	1.23
	城镇用地	0.00	3.98	0.46	0.00	0.92	90.96	0.92	2.76	0.00
	农村居民点	0.11	6.69	1.24	0.22	0.06	3.04	87.46	1.12	0.06
	其他建设用地	0.00	4.69	0.75	1.69	0.75	1.88	1.31	88.37	0.56
	未利用地	0.00	2.63	0.00	2.63	15.79	0.00	2.63	0.00	76.32
横断山区	水田	87.87	2.90	3.08	1.49	0.79	1.76	1.49	0.62	0.00
	旱地	0.32	89.37	4.01	4.95	0.39	0.16	0.34	0.41	0.05
	林地	0.13	1.03	94.96	3.36	0.29	0.01	0.07	0.06	0.09
	草地	0.13	0.69	3.71	94.17	0.39	0.01	0.08	0.07	0.76
	水域	1.38	1.19	12.06	19.17	64.43	0.00	0.00	0.00	1.78
	城镇用地	3.85	0.00	0.00	7.69	0.00	84.62	0.00	0.00	3.85
	农村居民点	0.93	3.70	1.85	5.56	0.93	1.85	83.33	0.00	1.85
	其他建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
	未利用地	0.00	0.25	0.94	12.74	0.22	0.00	0.00	0.00	85.86
黔桂喀斯特山区	水田	95.94	1.56	0.38	0.07	0.36	0.84	0.34	0.48	0.02
	旱地	0.08	96.66	1.36	0.46	0.31	0.40	0.09	0.64	0.00
	林地	0.07	0.23	98.72	0.48	0.25	0.05	0.02	0.18	0.00
	草地	0.05	1.29	5.87	92.01	0.32	0.12	0.03	0.32	0.00
	水域	0.55	0.82	2.20	0.27	95.33	0.55	0.00	0.00	0.27
	城镇用地	0.00	1.28	0.00	0.00	1.28	96.15	0.00	1.28	0.00
	农村居民点	1.49	0.60	0.00	0.00	0.00	0.60	97.32	0.00	0.00
	其他建设用地	6.25	0.00	0.00	0.00	0.00	9.38	3.13	81.25	0.00
	未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	16.67	0.00	0.00	16.67	66.67

2000 m和2500~3000 m。黔桂喀斯特山区的耕地在不同高程的分布与太行山区相似,耕地分布的峰值对应的高程范围分别为0~200 m和800~1400 m。

3.2 中国三大山区农业水资源分布时空变化

本研究中,水资源变化研究时段为2000—2015年,选择各地级市2000—2005年的平均水资源情况反映期初的水资源情况;为了避免2010年西南大旱对水资源的影响,选择各地级市2012—2017年的平均水资源情况反映期末的水资源情况(表4),其中,由于未获取到西藏各年水资源的准确数据,故两期数据均使用了多年平均值。从水资源总量的时间变化上看,2000—2005年太行山区的水资源总量为239.55亿 m^3 ,到了2012—2017年增加为255.30亿 m^3 。其中,水资源的增加主要发生在北京、河北和山西,河南5个市的水资源总量共计减少了24.48%。横断山区的水资源总量由3367.45亿 m^3 减少到了3189.56亿 m^3 。黔桂喀斯特山区的水资源总量由1921.13亿 m^3 增长到了2142.11亿 m^3 ,其中,广西的水资源总量增加明显,贵州的水资源总量略有增加。

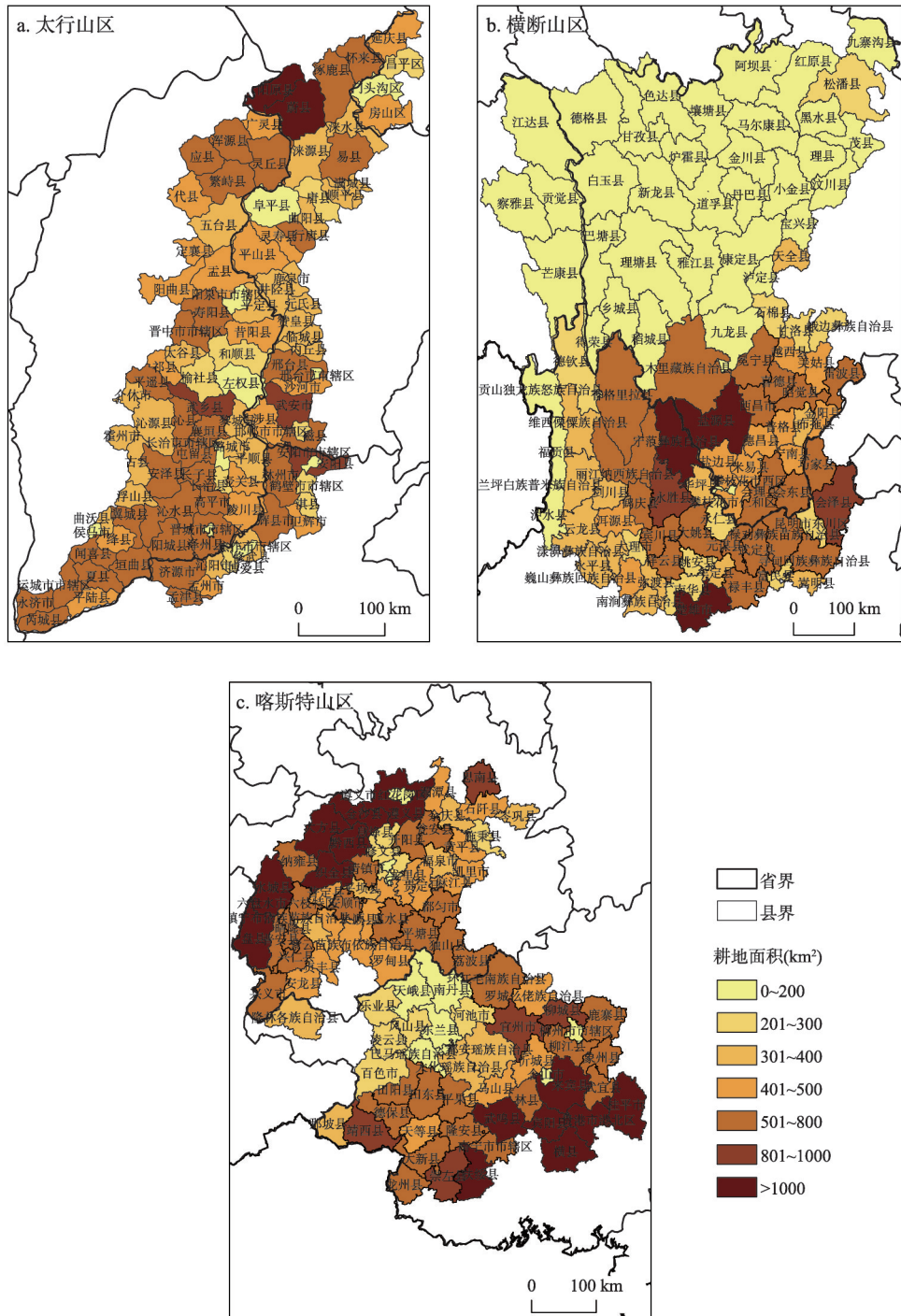


图1 2015年中国三大山区耕地分布

Fig. 1 Distribution of farmland among three mountainous areas in China in 2015

从农业水资源量的时间变化上看,太行山区和横断山区的农业水资源量分别减少了6.22%和8.15%,主要体现在北京、河南、云南、四川。其中,太行山区农业水资源量的

表3 中国三大山区地形条件

Tab. 3 Terrain condition among three mountainous areas in China

区域	最低高程(m)	最高高程(m)	平均高程(m)	最低坡度(°)	最高坡度(°)	平均坡度(°)
太行山区范围	25	2899	927.17	0	26.50	3.75
横断山区范围	-13	6903	3307.90	0	55.38	9.86
喀斯特山区范围	-70	5442	748.98	0	52.00	3.19
太行山区水田	18	1104	124.96	0.03	7.99	0.44
横断山区水田	282	4327	1651.43	0.02	45.80	4.46
喀斯特山区水田	-23	2205	574.90	0	39.38	2.22
太行山区旱地	5	2256	617.79	0	18.12	1.65
横断山区旱地	194	5816	2053.74	0.01	54.67	8.08
喀斯特山区旱地	-20	2613	789.93	0	47.47	2.94

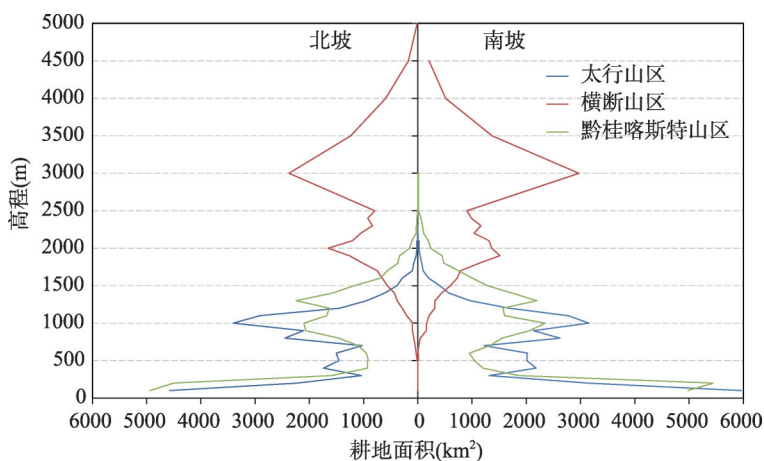


图2 2015年中国三大山区耕地在不同高程、坡向的分布

Fig. 2 Distribution of farmland at different elevations and slope aspects among three mountainous areas in China in 2015

表4 中国三大山区水资源总量及农业用水量

Tab. 4 Total water resources and agricultural water consumption among three mountainous areas in China

区域	省份	平均高程 (m)	2000—2005年	2000—2005年	2012—2017年	2012—2017年
			平均水资源 总量(亿m ³)	平均农业水 资源量(亿m ³)	平均水资源 总量(亿m ³)	平均农业水 资源量(亿m ³)
太行山区	河南	271.62	66.41	41.82	50.15	27.71
	北京	362.55	19.18	7.88	29.36	5.79
	河北	439.03	68.91	22.26	79.83	22.26
	山西	1121.41	84.58	50.04	100.97	58.65
	小计	548.65	239.08	122.00	260.31	114.41
横断山区	云南	2346.70	914.99	633.17	737.11	510.08
	四川	2583.35	1907.74	1133.18	1833.53	1103.06
	西藏	4460.24	498.66	112.56	498.66	112.56
	小计	3130.10	3321.38	1878.91	3069.29	1725.70
黔桂喀 斯特山区	广西	363.41	912.95	632.11	1159.92	780.74
	贵州	1157.74	1008.18	629.66	1023.54	550.64
	小计	760.58	1921.13	1261.77	2183.46	1331.38

减少主要是由于河南省水资源总量的减少和北京市的农业用水量占总用水量的比例的降低，太行山区的农业用水量比例由期初的47.73%下降到了期末的39.88%，其中，北京的农业用水量占比下降最为明显，由41.05%下降到了19.74%，下降了21.32%。而横断山区的农业用水量占总用水量的比例基本稳定在49.95%左右，其农业水资源量的减少主要是由于云南、四川水资源总量的减少，其中，云南的水资源总量减少了19.44%，四川的水资源总量减少了3.89%。喀斯特山区的农业水资源量增加了5.52%，增加的农业水资源量主要分布在广西，其农业水资源量的增加主要是由于广西、贵州的水资源总量的增加，其中，广西的水资源总量增加最多，增加了27.05%，贵州的水资源量增加了1.52%。而喀斯特山区的农业用水比例略有降低，由64.20%降低到了58.32%。

从水资源的空间分布上看，三大山区中，横断山区的水资源和农业水资源最为丰富，其次为喀斯特山区。太行山区的水资源主要分布在山西、河北地区，而农业水资源以山西、河南段最为丰富。横断山区的水资源和农业水资源都主要分布在四川境内。黔桂喀斯特山区的水资源和农业水资源较均匀地分布在广西和贵州境内。从水资源的垂直分布来看，水资源和农业水资源的分布及变化都主要集中在低海拔地区，太行山的水资源主要分布在东部低海拔地区，横断山的水资源主要分布在北部低海拔地区，喀斯特山区的水资源主要分布在东部低海拔地区。

3.3 中国三大山区农业水土资源匹配格局时空变化

研究时期初，太行山区农业水土资源匹配系数为2030，相当于每公顷耕地上可利用的农业水资源为2030 m³，研究时期末为1940，水土匹配程度较差。其中，由于北京的农业水资源量减少明显，其期初的农业水土匹配系数为4890，期末为3900，农业水土匹配程度有所降低。研究时段内，河北省的农业水土匹配系数保持在1320左右，农业水土匹配程度较差，由于河北为粮食主产区，但河北境内年降水量远远小于蒸发量，河流大多为枯水河，且地下水位也不断下降，导致水资源短缺成了太行山河北段的主要特征^[22]。山西省期初农业水土匹配系数为1520，期末为1820，山西省耕地资源相对丰富，但资源性缺水严重^[23]，农业水土匹配程度极差。河南省期初农业水土匹配系数为4870，期末为3290，农业水土匹配程度较差。从农业水土匹配系数的分布和变化来看（图3），太行山区东部中低海拔地区的农业水土匹配程度较好。研究时段内，太行山区中部地区的农业水土匹配程度有转好趋势，南部、北部地区的农业水土匹配程度有变差趋势，且农业水土资源匹配程度有变差趋势的地区主要分布在中低海拔地区。其中，河南省5个市的农业水土匹配程度均是变差的。这主要与当地人口数量、耕地面积的增长、用水结构改变

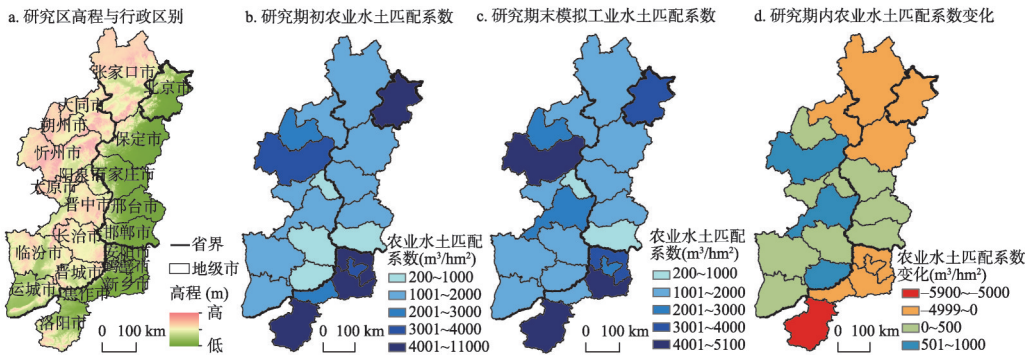


图3 太行山区农业水土资源匹配系数

Fig. 3 Matching coefficient of agricultural soil and water resources in Taihang mountainous area

以及用水效率低下、水利设施建设滞后有关, 农业水资源相对于耕地数量的短缺日趋严重, 将成为当地农业发展的重要限制因素^[24-26]。

研究时期期初, 横断山区农业水土资源匹配系数为 44000, 期末为 49330, 农业水土匹配程度较好, 这主要是受昌都地区水资源丰富的影响。其中, 四川期初的农业水土匹配系数为 59740, 期末为 69590, 农业水土匹配程度良好。横断山区中四川省境内的地级市的农业水土匹配系数均在 16000 以上, 其中, 西部的阿坝州、甘孜州、凉山州、攀枝花市 4 市州拥有全省 14% 的耕地面积和 56% 的水资源量^[27]。云南期初的农业水土匹配系数为 27020, 期末为 27060, 研究时段内其耕地资源和农业水资源均有所减少, 总体来看, 其农业水土匹配程度较好且较为稳定。西藏昌都地区的耕地数量有限, 但河流众多, 水资源十分丰富, 期初的农业水土匹配系数为 373950, 期末为 400210, 农业水土匹配程度良好。从研究时段内的农业水土匹配系数的分布和变化来看 (图 4), 横断山区北部中高海拔地区的农业水土匹配程度较好, 横断山区西南部的农业水土匹配程度较差, 中低海拔地区农业水土资源匹配程度变差明显。且西南部地区的农业水土匹配程度变差也最明显, 变差地区主要位于云南省、四川省境内, 导致横断山区内农业水土匹配程度的空间分布差异持续增大, 贫水地区水资源短缺问题继续加剧。

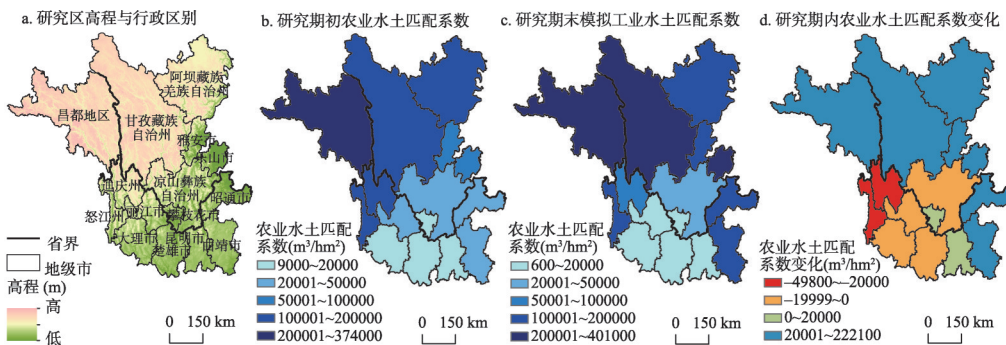


图 4 横断山区农业水土资源匹配系数

Fig. 4 Matching coefficient of agricultural soil and water resources in Hengduan mountainous area

研究时期期初, 喀斯特山区农业水土资源匹配系数为 19430, 期末为 20600, 农业水土匹配程度较好。其中, 贵州期初的农业水土匹配系数为 18620, 期末为 16140, 农业水土匹配程度较好。广西的农业水资源有所增加, 而耕地资源有所减少, 使其农业水土匹配系数有较明显的上升, 其期初的农业水土匹配系数为 20310, 期末为 25590, 农业水土匹配程度较好。喀斯特山区来水量稳定且丰富, 缺水的原因主要是工程性缺水^[19], 导致农业用水量占总用水量的比例较低, 2015 年仅为 58.32%。从农业水土匹配系数的分布和变化来看 (图 5), 喀斯特山区中部中低海拔地区的农业水土匹配程度较好。研究时段内, 南部低海拔地区的农业水土匹配程度转好最明显, 农业水土匹配系数上升较多的地级市均分布在广西省, 而贵州省内的 9 个市 (地区) 的农业水土匹配系数均出现了下降的趋势。

4 讨论与结论

4.1 讨论

山区农业水土资源的不匹配不仅会影响山区的农业发展, 还会带来水土流失、山地

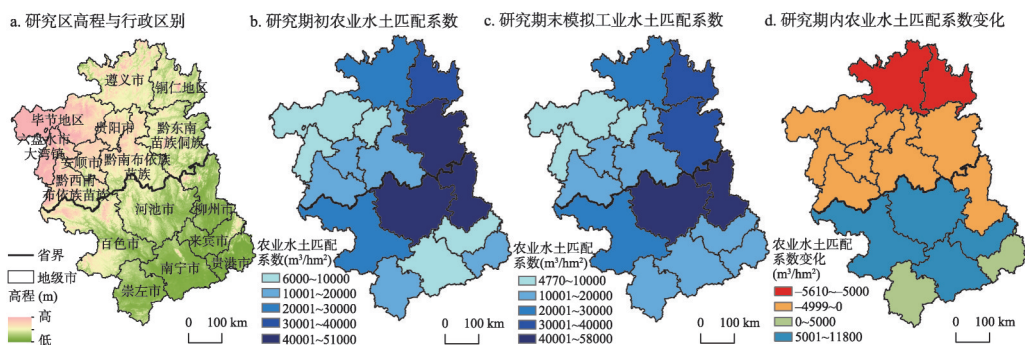


图5 黔桂喀斯特山区农业水土资源匹配系数

Fig. 5 Matching coefficient of agricultural soil and water resources in karst mountainous area of Guizhou and Guangxi

灾害等负面影响, 应该加强对山区农业水土资源匹配情况和山区农业发展的研究。农业水土资源的匹配程度主要取决于耕地数量和水资源利用结构等因素。可以进一步将影响水土资源匹配的因素归纳为资源性缺水 and 工程性缺水, 在喀斯特山区内, 限制水土资源匹配的主要是水利工程发展缓慢导致的工程性缺水^[19], 应重视加强水利工程建设, 发展节水灌溉^[28]。而太行山区的水土资源不匹配主要是由于资源性缺水引起的。研究时段内, 太行山区是三大山区中农业水土资源匹配程度最差的, 而且太行山区内水田转旱地情况十分突出, 平均每年有 17.12 km² 的水田转成了旱地, 水资源在这一地区成为制约农业发展的重要因素。应该注意到太行山区的用水压力, 重视农田水利设施的维护和农田灌溉水有效利用系数的提高。同时, 还应合理确定农业灌溉用水定额和农业灌溉面积, 避免过度开发水资源而造成土地退化^[29]等会造成生态环境问题的现象出现, 也避免土地利用变化对水资源匮乏形势的加剧^[30], 为当地农业的稳定发展提供保障。农业水土资源的匹配与耦合是一个复杂的系统, 除了上述提到的影响因素外, 还会受到土壤下垫面特性等因素的影响, 进一步的研究应该在解释山区农业水土资源匹配格局的形成方面展开。

4.2 结论

(1) 三大山区耕地分布的集中程度较高。太行山区的耕地主要分布在河北境内的北段地区和山西境内的南段地区, 横断山区的耕地主要分布在南段地区, 喀斯特山区的耕地分布呈现“南北多中部少”的格局。从耕地的垂直分布来看, 太行山区耕地主要集中在 1500 m 以下; 横断山区耕地主要集中在 4000 m 以下; 黔桂喀斯特山区耕地主要集中在 2000 m 以下。太行山区、喀斯特山区内的耕地分布规律为随着高程的增加表现为先减少再增加随后再减少, 横断山区内的耕地分布随着高程的增加表现为先增加再减少随后再增加再减少。从耕地的时空变化上看, 1990—2015 年期间, 太行山区耕地面积减少了 2.11%, 其中部和东南部地区耕地减少明显, 北部耕地增加明显, 耕地变化剧烈区域主要集中在 800 m 高程以下; 横断山区耕地面积增加了 0.27%, 其南部地区耕地减少明显, 中部地区耕地增加明显, 耕地变化剧烈区域主要集中在 2500 m 高程以下; 喀斯特山区耕地面积减少了 1.48%, 其南部地区耕地减少明显, 北部地区耕地增加明显, 耕地变化剧烈区域主要集中在 200 m 高程以下。

(2) 三大山区农业水资源的分布及变化都主要集中在低海拔地区。太行山区的农业水资源主要分布在山西、河南段, 横断山区的农业水资源主要分布在四川境内, 喀斯特山区的农业水资源较均匀地分布在广西和贵州境内。从农业水资源的时空变化上看, 2000—2015 年期间, 太行山区的农业水资源量减少了 6.22%, 主要体现在北京、河南

段; 横断山区的农业水资源量减少了 8.15%, 主要体现在云南、四川段; 喀斯特山区的农业水资源量增加了 5.52%, 增加的农业水资源量主要分布在广西境内。

(3) 太行山区农业水土资源匹配程度较差, 表现为耕地多、农业水资源少, 尤其是太行山区中部地区, 而横断山区和喀斯特山区的农业水土资源匹配程度较好。2000—2015年期间, 太行山区、横断山区中低海拔地区的农业水土资源匹配程度有变差趋势, 黔桂喀斯特山区中低海拔地区的农业水土资源匹配程度有变好趋势。太行山区中部、横断山区东部、喀斯特山区南部地区的农业水土资源匹配程度有变好趋势, 而太行山区南部、横断山区西南部、喀斯特山区北部地区的农业水土资源匹配程度有变差趋势。

参考文献(References)

- [1] 邓伟, 戴尔阜, 贾仰文, 等. 山地水土要素时空耦合特征、效应及其调控. 山地学报, 2015, 33(5): 513-520. [Deng Wei, Dai Erfu, Jia Yangwen, et al. Spatiotemporal coupling characteristics, effects and their regulation of water and soil elements in mountainous area. Mountain Research, 2015, 33(5): 513-520.]
- [2] Riquelme F J, Ramos A B. Land and water use management in vine growing by using geographic information systems in Castilla-La Mancha, Spain. Agricultural Water Management, 2005, 77(1-3): 1-95.
- [3] 田卫堂, 胡维银, 李军, 等. 我国水土流失现状和防治对策分析. 水土保持研究, 2008, 15(4): 204-209. [Tian Weitang, Hu Weiyin, Li Jun, et al. The status of soil and water loss and analysis of countermeasures in China. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(4): 204-209.]
- [4] 李树德, 吕红华, 袁仁茂. 山地灾害与水土流失. 水土保持研究, 2003, 10(3): 107-108. [Li Shude, Lv Honghua, Yuan Renmao. Mountain disasters and soil and water loss. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(3): 107-108.]
- [5] 陈国阶. 我国山区农业发展急需转变战略思维. 山地学报, 2001, 19(4): 339-343. [Chen Guojie. Agricultural development in China's mountain regions urges to transferring strategical thinkings. Mountain Research, 2001, 19(4): 339-343.]
- [6] 李慧, 周维博, 庄妍, 等. 延安市农业水土资源匹配及承载力. 农业工程学报, 2016, 32(5): 156-162. [Li Hui, Zhou Weibo, Zhuang Yan, et al. Agricultural water and soil resources matching patterns and carrying capacity in Yan'an city. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(5): 156-162.]
- [7] Viviroli D, Archer D R, Buytaert W, et al. Climate change and mountain water resources: Overview and recommendations for research, management and policy. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(2): 471-504.
- [8] 骆华松, 杜娟, 胡志丁. 云南省水资源承载力评价. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 46-50. [Du Juan, Luo Huasong, Hu Zhiding. Evaluation of water resources carrying capacity in Yunnan province. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(1): 46-50.]
- [9] 楚文海, 高乃云, 鄢贵权, 等. 西南岩溶山区水资源可持续利用评价指标选取及权重确定. 水土保持通报, 2008, 28(1): 59-64. [Chu Wenhai, Gao Naiyun, Yan Guiquan, et al. Indicator selection and weight determination of water resources for sustainable utilization in the southwest karst area. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(1): 59-64.]
- [10] Gautam A P, Webb E L, Shivakoti G P, et al. Land use dynamics and landscape change pattern in a mountain watershed in Nepal. Agriculture Ecosystems and Environment, 2003, 99(1-3): 83-96.
- [11] 党国锋, 吴翠霞, 武江民. 陇南山区国土资源承载力评价研究: 以两当县为例. 中国农学通报, 2016(35): 71-79. [Dang Guofeng, Wu Cuixia, Wu Jiangmin. Evaluation of territorial resources bearing capacity in Longnan mountain area: Taking Liangdang county as an example. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016(35): 71-79.]
- [12] Kessler C A, Stroosnijder L. Land degradation assessment by farmers in Bolivian mountain valleys. Land Degradation and Development, 2010, 17(3): 235-248.
- [13] Thomas J, Joseph S, Thrivikramji K P. Assessment of soil erosion in a tropical mountain river basin of the southern Western Ghats, India using RUSLE and GIS. Geoscience Frontiers, 2018, 9(3): 893-906.
- [14] 孙晶华, 张吴平, 吴亚楠, 等. 山西省农业水土资源时空匹配及短缺分析. 山西农业科学, 2017, 45(3): 443-447, 464. [Sun Jinghua, Zhang Wuping, Wu Yanan, et al. Study on Spatial-temporal matching pattern and shortage of agricultural water and land resources in Shanxi province. Journal of Shanxi Agricultural Sciences. 2017, 45(3): 443-447, 464.]
- [15] 刘昌明, 魏忠义. 华北平原农业水文及水资源. 北京: 科学出版社, 1989: 236. [Liu Changming, Wei Zhongyi. Agrohydrology and Water Resources in North China Plain. Beijing: Science Press, 1989: 236.]
- [16] 王襄平, 王志恒, 方精云. 中国的主要山脉和山峰. 生物多样性, 2004, 12(1): 206-212. [Wang Xiangping, Wang Zhiheng, Fang Jingyun. Mountain ranges and peaks in China. Biodiversity Science, 2004, 12(1): 206-212.]

- [17] 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题. 地理学报, 2012, 67(7): 878-888. [Xiong Kangning, Li Jin, Long Mingzhong. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating Karst rocky desertification. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 878-888.]
- [18] 苏维词, 朱文孝. 贵州喀斯特山区生态环境脆弱性分析. 山地学报, 2000, 18(5): 429-434. [Su Weici, Zhu Wenxiao. The eco-environmental fragility in Karst mountain regions of Guizhou province. *Mountain Research*, 2000, 18(5): 429-434.]
- [19] 朱文孝, 李坡, 贺卫, 等. 贵州喀斯特山区工程性缺水解决的出路 with 关键科技问题. 贵州科学, 2006, 24(1): 1-7. [Zhu Wenxiao, Li Po, He Wei, et al. Solutions and major scientific problems on engineering water shortage in Karst mountain area of Guizhou. *Guizhou Science*, 2006, 24(1): 1-7.]
- [20] 刘彦随, 甘红, 张富刚. 中国东北地区农业水土资源匹配格局. 地理学报, 2006, 61(8): 847-854. [Liu Yansui, Gan Hong, Zhang Fugang. Analysis of the matching patterns of land and water resources in Northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(8): 847-854.]
- [21] 陈百明. 中国土地利用与生态特征区划. 北京: 气象出版社, 2003: 11. [Chen Baiming. *Land Use and Ecological Characteristics Regionalization in China*. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 11.]
- [22] 李慧. 水土资源农业生产潜力分析及综合可持续利用的研究. 石家庄: 河北师范大学硕士学位论文, 2012. [Li Hui. Study on the agricultural production potential analysis and sustainable use of soil and resources: Taking the area of Hebei Taihang as an example. Shijiazhuang: Master Dissertation of Hebei Normal University, 2012.]
- [23] 陈晓兵, 段喜明. 山西农业水土资源问题及其对策研究. 山西水土保持科技, 2005, (2): 9-11. [Chen Xiaobing, Duan Ximing. Soil and water conservation science and technology in Shanxi. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, 2005, (2): 9-11.]
- [24] 张衍毓, 王静, 陈美景. 河南省粮食生产核心区建设的战略思考. 中国土地科学, 2012, 26(3): 18-21. [Zhang Yanyu, Wang Jing, Chen Meijing. Strategic thinking for grain production core area construction in Henan province. *China Land Sciences*, 2012, 26(3): 18-21.]
- [25] 张红卫, 吴湘婷. 河南省近 11 a 水资源情势变化及可持续利用. 人民黄河, 2013, 35(9): 55. [Zhang Hongwei, Wu Xiangting. Water resources regime variation during 2001-2011 and countermeasures of sustainable utilization in Henan province. *Yellow River*, 2013, 35(9): 55.]
- [26] 文倩, 孟天醒, 鄢雨早. 河南省农业水土资源时空分异与匹配格局. 水土保持研究, 2017, 24(5): 233-239. [Wen Qian, Meng Tianxing, Yun Yuhuan. Temporal and spatial variation and match pattern of agricultural land and water resources in Henan province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 233-239.]
- [27] 黄克威, 袁鹏, 刘刚. 基于 DEA 的四川省水土资源匹配研究. 中国农村水利水电, 2015, (10): 58-61. [Huang Kewei, Yuan Peng, Liu Gang. Research on water and soil resources matching in Sichuan province based on DEA. *China Rural Water and Hydropower*, 2015, (10): 58-61.]
- [28] 黄修桥, 高峰, 王宪杰. 节水灌溉与 21 世纪水资源的持续利用. 灌溉排水学报, 2001, 20(3): 1-5. [Huang Xiuqiao, Gao Feng, Wang Xianjie. Water-saving irrigation and sustainable utilization of water resources in the 21st century. *Irrigation and Drainage*, 2001, 20(3): 1-5.]
- [29] 张柏, 崔海山, 于磊. 东北平原西部半干旱地区土地退化研究. 农业系统科学与综合研究, 2003, 19(1): 30-32. [Zhang Bai, Cui Haishan, Yu Lei. Study on land degradation in semi-arid areas in the west of Northeast plain. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2003, 19(1): 30-32.]
- [30] 杨艳昭, 张伟科, 封志明, 等. 土地利用变化的水土资源平衡效应研究: 以西辽河流域为例. 自然资源学报, 2013, 28(3): 437-449. [Yang Yanzhao, Zhang Weike, Feng Zhiming, et al. Land use change induced land and water resources balance: A case study on the Xiliaohe watershed. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(3): 437-449.]

Spatio-temporal variations of the matching patterns of agricultural land and water resources in typical mountainous areas of China

WANG Jiayue^{1,2}, XIN Liangjie¹, DAI Erfu¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To understand the matching degree and pattern change of agricultural soil and water resources in three typical mountainous areas of China, the matching coefficient of agricultural soil and water resources was introduced to describe the spatial and temporal matching patterns of land and water resources in the study region by the amount of agricultural water resources on the unit area farmland. The results show that: (1) the concentration degree of farmland distribution in the three areas is high. The farmland in the Taihang Mountains is mainly distributed in the northern part of Hebei province and the southern part of Shanxi province, while it is mainly found in the southern part of the Hengduan Mountains. The farmland in karst mountains shows a distribution pattern of "more in the north and south, while less in the center". The farmland in the Taihang and karst mountainous areas decreased first, then increased and again decreased with the increase of elevation. The farmland in the Hengduan Mountains increased first, then decreased, again increased and decreased with the increase of elevation. (2) The distribution and change of agricultural water resources are mainly concentrated in low altitude areas. The agricultural water resources in the Taihang Mountains are mainly distributed in Shanxi and Henan, those in Hengduan Mountains are mainly distributed in Sichuan, and those in the karst mountains are evenly distributed in Guangxi and Guizhou. From the spatio-temporal variations, during 2000-2015, the agricultural water resources in the Taihang Mountains decreased by 6.22%, mainly in Beijing and Henan; those in the Hengduan Mountains decreased by 8.15%, mainly in Yunnan and Sichuan; the agricultural water resources in karst mountains increased by 5.52%, mainly in Guangxi. (3) The matching degree of agricultural soil and water resources in the Taihang Mountains was low, while that in the Hengduan Mountains and karst mountains was high. From 2000 to 2015, the matching degree of agricultural soil and water resources improved in the central Taihang Mountains, eastern Hengduan Mountains, and southern karst mountains, while that in southern Taihang Mountains, southwestern Hengduan Mountains, and northern karst mountains has worsened. During the study period, the conversion of the paddy field to dry land in the Taihang Mountains is prominent, and the matching degree of agricultural soil and water resources in the Taihang was the worst among the three mountainous areas. We should focus on the water pressure in the region, the maintenance of irrigation facilities and the improvement of the effective utilization coefficient of irrigation water.

Keywords: agricultural land and water resources; matching patterns; spatio-temporal variations; Taihang Mountains; Hengduan Mountains; Karst mountains