

# 基于 InVEST 模型的南北盘江流域 产水量时空变化研究

伍堂银<sup>1,2</sup>, 周忠发<sup>1,2</sup>, 张露<sup>1,2</sup>, 陈全<sup>1,3</sup>, 罗丹<sup>1,2</sup>, 吴岚<sup>1,2</sup>

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院/地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550001; 3. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** [目的] 研究南北盘江流域产水量的时空变化特征以及不同土地利用类型、土壤类型和地形之间的产水功能差异, 以期为流域内水资源有效管理和生态修复提供科学参考。[方法] 基于 InVEST 模型定量评估了 2005—2020 年南北盘江流域产水量的时空变化特征、内部差异性及其对植被恢复对该地区产水功能的影响。[结果] 2005—2020 年流域内的平均产水总量小幅波动, 在空间上呈现东北部与中部高, 西南部低的趋势, 总体产水格局与降水量时空变化具有空间吻合性。在不考虑降雨量显著变化的情况下, 耕地与草地面积减少是导致流域内产水总量呈现出小幅波动下降趋势的主要原因。各土地利用类型中产水能力最强的类型为建设用地, 其次分别为裸地、耕地和草地。常绿针叶林与灌木林的产水能力较弱。流域内的产水能力随海拔升高而逐渐降低, 土壤以产水能力较强的黄壤与红壤为主。该流域产水高值区主要集中于低、中海拔, 以黄壤与红壤为主的东北部与中部区域; 低值区主要集中于高、较高海拔, 分布着大量石灰(岩)土和紫色土的西南部。[结论] 该流域产水量空间格局有一定变化, 其产水高值区有向东、东北偏移的趋势。土地利用类型、气象因子、土壤质地、地形等因素对产水功能空间异质性有重要影响。

**关键词:** 生态系统服务; 南北盘江流域; InVEST 模型; 产水量; 时空变化

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)03-0129-10

中图分类号: X171.1, F301.2

**文献参数:** 伍堂银, 周忠发, 张露, 等. 基于 InVEST 模型的南北盘江流域产水量时空变化研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 129-138. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.017; Wu Tangyin, Zhou Zhongfa, Zhang Lu, et al. Spatial-temporal variation of water yield in Nanbei Panjiang River basin based on InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 129-138.

## Spatial-temporal Variation of Water Yield in Nanbei Panjiang River Basin Based on InVEST Model

Wu Tangyin<sup>1,2</sup>, Zhou Zhongfa<sup>1,2</sup>, Zhang Lu<sup>1,2</sup>, Chen Quan<sup>1,3</sup>, Luo Dan<sup>1,2</sup>, Wu Lan<sup>1,2</sup>

(1. School of Karst Science/School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China; 2. The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001, China; 3. National Karst Rocky Desertification Control Engineering Technology Research Center, Guiyang, Guizhou 550001, China)

**Abstract:** [Objective] The temporal and spatial variation characteristics of water yield and differences in the water yield function for different land use types, soil types, and topography in the Nanbei Panjiang River basin were analyzed in order to provide a scientific reference for the effective management of water resources and ecological restoration in the basin. [Methods] The spatial and temporal variation characteristics, internal differences, and the influence of vegetation restoration on the water yield function in the Nanbei Panjiang River basin from 2005 to 2020 were quantitatively evaluated using the InVEST model. [Results] The average total water yield in the basin fluctuated slightly from 2005 to 2020, showing a trend of higher in the northeast

收稿日期: 2022-08-24

修回日期: 2022-09-18

资助项目: 贵州省科技计划项目“贵州喀斯特山区地块尺度农田土壤水时空协同遥感反演研究”(黔科合基础-ZK[2022]一般 302); 贵州省科技计划项目“喀斯特洞穴系统碳循环机制研究”(黔科合基础[2020]Y154); 贵州省自然资源厅项目(HXDZB-022)

第一作者: 伍堂银(1999—), 男(汉族), 贵州省遵义市人, 硕士研究生, 研究方向为喀斯特生态建设与区域经济。Email: 21010170545@gznu.edu.cn.

通信作者: 周忠发(1969—), 男(汉族), 贵州省遵义市人, 教授, 主要从事喀斯特资源环境、GIS 与遥感研究。Email: fa6897@163.com.

and central regions and lower in the southwest. The overall water yield pattern was spatially consistent with the spatial and temporal changes of precipitation. Without considering the significant change of rainfall, the decrease of cultivated land and grassland areas was the main reason for the slight fluctuation and downward trend of total water yield in the basin. The land use type with the strongest water yield capacity was construction land, followed by bare land, cultivated land, and grassland. The water yield capacities of evergreen coniferous forest and shrub land were weak. The water yield capacity in the basin gradually decreased with increasing altitude, and the soils with strong water yield capacity were mainly yellow soil and red soil. The high water yield areas in the basin were mainly concentrated in the northeast and central regions having low and medium altitudes, and were mainly yellow soil and red soil. The low value area was mainly concentrated in the southwest region having high and higher altitudes with large amounts of lime (rock) soil and purple soil. [Conclusion] The spatial pattern of water yield in the basin exhibited some changes, and the high value area of water yield had a tendency to shift to the east and northeast. Land use type, meteorological factors, soil texture, topography, and other factors have an important impact on the spatial heterogeneity of the water yield function.

**Keywords:** ecosystem services; Nanbei Panjiang River basin; InVEST model; water yield; temporal and spatial variation characteristics

生态系统服务是指人类从生态系统中直接或间接获得(包括有形产品以及无形服务在内)的所有惠益<sup>[1]</sup>,而生态系统服务评估则是对生态系统所提供和维持的进行定量表达<sup>[2]</sup>。2005年联合国发布的千年生态系统评估报告中指出,全球60%的生态系统服务发生了退化<sup>[3]</sup>。水作为生命之源,是生物生存不可或缺的部分,在生态系统内转换、运移等过程中能够产生多种服务效应<sup>[4]</sup>。因此,如何实现生态系统产水服务功能的空间可视化与定量化评估已成为区域可持续发展的关键<sup>[5]</sup>。

随着高空间分辨率数据集和各种水文模型的应用,国内外学者基于不同样本区、景观类<sup>[6]</sup>、区域和全球尺度<sup>[7]</sup>,对流域<sup>[8]</sup>、河流<sup>[9]</sup>、湿地<sup>[10]</sup>等不同研究对象进行生态系统服务功能的评估研究,如MIKESHE模型、SWAT模型、TOPMODEL模型和InVEST模型等<sup>[11]</sup>。其中,InVEST模型以水量平衡法为基础,与传统的土壤蓄水能力法<sup>[12]</sup>、综合蓄水能力法<sup>[13]</sup>、多因子分析法<sup>[14]</sup>等方法相比,考虑了区域蒸散发量的影响,具有结构简单、输入参数获取便捷、全球通用、能够可视化产水功能的空间特征等优点。在一定程度上解决了评估结果实用性差、服务功能形成机制不明确等问题,为评估产水服务功能提供了新的视角<sup>[15]</sup>。近年来,有关InVEST模型在国内外的应用已较为成熟,国外学者基于InVEST模型评估了非洲科特迪瓦<sup>[16]</sup>、西班牙Francoli流域<sup>[17]</sup>、尼泊尔Bagmati流域<sup>[18]</sup>等地的水源涵养进行评估,且模拟结果及运用较好;国内学者基于InVEST模型对喀斯特山区<sup>[19]</sup>、黄土高原地区<sup>[20]</sup>、黑河流域<sup>[21]</sup>、三江源地

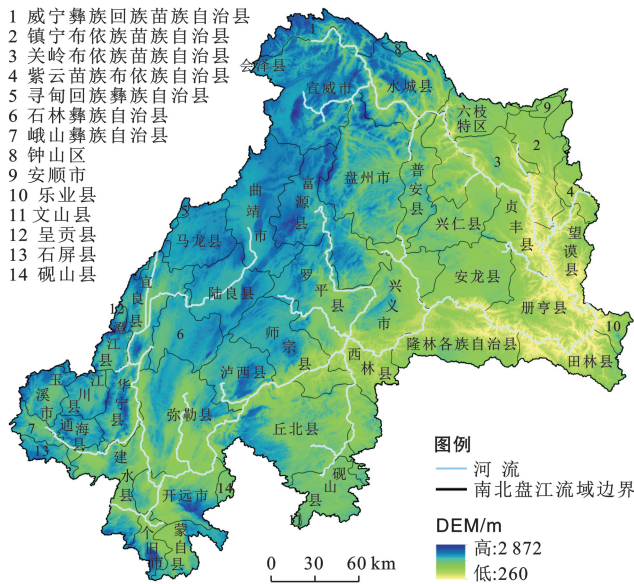
区<sup>[22]</sup>、横断山区<sup>[23]</sup>等的产水量或水源涵养及其时空变化特征进行了评价,模拟结果均得到了较好的应用效果。

南北盘江流域作为珠江流域的上游,是珠江流域极为重要的水源地。流域内石灰岩广泛发育且土层浅薄、生态承载力较低、石漠化发育剧烈,是珠江流域水土流失最严重的地区<sup>[24]</sup>。目前,已有学者对南北盘江流域的森林生态系统水源涵养<sup>[13]</sup>、生态修复与水土保持<sup>[25-26]</sup>、水质净化<sup>[27]</sup>、地下水资源评价<sup>[28]</sup>、生境质量评价<sup>[29]</sup>、土地利用变化与气候变化对径流影响<sup>[30-31]</sup>等进行研究,但多数学者仅对单一的土地利用类型进行研究,忽略了其他土地利用类型以及土壤、地形因素对流域产水量的影响。因此,以南北盘江流域为整体的评价单元,对所有土地利用类型、不同土壤类型以及不同地形产水量进行量化评价的研究还需要深入研究。本研究运用InVEST模型中的产水量模块,结合“3S”技术,克服了传统方法在研究尺度和跨省研究的局限性,从时间和空间两个角度上对南北盘江流域的产水服务功能进行评估,探究多年间南北盘江流域产水功能的时空变化特征、内部差异性及其植被恢复对该地区产水功能的影响,以期对南北盘江流域退耕还林还草工程、水资源管理提供科学参考。

## 1 研究区概况

南北盘江流域(图1)( $102^{\circ}15' - 106^{\circ}22' E$ ,  $23^{\circ}8' - 26^{\circ}54' N$ )作为珠江流域的上游,发源于云南省沾益县马雄山,是珠江流域极为重要的水源地,干流全长分别为914.5 km和449 km,流经云南、贵州、

广西 3 个省份,流域面积约 81 764.2 km<sup>2</sup>[32]。境内地势西北高东南低,地貌发育强烈且类型繁多,属于亚热带季风气候,主要植被类型为常绿、落叶阔叶林和针叶林,5—10 月为雨季,11—次年 4 月为旱季,降雨大部分集中在雨季,年平均气温 12.65~21.25 °C,年平均降水量 930.38~1 281.12 mm[13]。南北盘江流域内 70% 地区属于碳酸盐岩地层,且盘江中上游含煤岩组广泛发育,其余地区属于二叠系玄武岩及侏罗系砂岩,石灰岩分布广泛,属于中国典型的喀斯特生态脆弱区,主要土壤类型为红壤、黄壤、石灰土、紫色土等。



注:本图基于[黔 S(2023)009 号、云 S(2020)102 号、桂 S(2020)48 号]标准地图校核制图。下同。

图 1 南北盘江流域研究区概况

Fig.1 Overview of study area in Nanbei Panjiang River basin

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本研究涉及的产水量模块输入数据主要包括 30 m DEM 数据、土地利用、气象数据、土壤数据、植被可利用水、生物物理参数表、流域边界等数据。研究所有影像数据空间分辨率均重采样到 30 m,坐标系均使用中国大地坐标系(CGCS2000)。

土地利用数据(空间分辨率为 30 m)下载于中国科学院空天信息创新研究院(<http://www.aircas.cas.cn/>);气象数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>);土壤数据来源于国家科技资源共享服务平台—国家地球系统科学数据中心—土壤分中心(<http://soil.geodata.cn/>);30 m DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);流

域边界在国家地球系统科学数据中心(2000 年)公布的南北盘江流域边界的基础上,利用 ArcGIS 水文分析工具进行提取;生物物理参数(表 1)来源于文献查阅[20-33]以及《InVEST 使用指南》。

表 1 产水量模型中不同土地利用类型的参数  
Table 1 Parameters of different land use types in water yield model

地类	Lucode	root_depth	$K_c$	LULC_veg
耕地	1	2 000	0.65	1
常绿阔叶林	2	5 000	1	1
落叶阔叶林	3	5 000	1	1
常绿针叶林	4	5 000	1	1
灌林地	5	3 000	0.9	1
草地	6	2 600	0.65	1
湿地	7	1 000	0.65	0
建设用地	8	1	0.1	0
裸地	9	1	0.5	1
水域	10	1	0	0
永久冰雪	11	1	0	0

注:Lucode 为地类编号; $K_c$  为每一地类对应的植被蒸散系数;root\_depth 为每一地类植物的最大根系深度(mm);LULC\_veg 的赋值是既定规则;植被覆盖地类(不包括湿地)赋值为 1;其他土地利用类型(包括湿地、城市用地、水体、永久冰雪)赋值为 0。

### 2.2 研究方法

本研究运用 InVEST 模型中的产水量模块模拟南北盘江流域产水量空间分布格局。产水量模块是根据水量平衡为基本原则的一种估算方法,在栅格尺度上通过降水量减去实际蒸散量(包含地面蒸发量与植被蒸腾量)得到栅格水平的产水量,该模块不能区分地表水、地下水、基流,而是假设每个栅格级别的产水通过地下径流或地表径流的方式到达流域出水口[34]。主要算法如下:

$$Y_{xj} = \left[ 1 - \frac{AET_{xj}}{P_x} \right] \times P_x \quad (1)$$

式中: $Y_{xj}$  是栅格  $x$  单位上的第  $j$  种土地覆盖类型的年产水量(mm); $AET_{xj}$  是栅格  $x$  单位上的第  $j$  种土地覆盖类型的年实际蒸散量(mm); $P_x$  为栅格  $x$  上的年平均降水量(mm)。其中,根据 Zhang 等基于 Budyko 提出的水—热耦合平衡假定计算出的蒸散部分  $\frac{AET_{xj}}{P_x}$ (实际蒸散量与降水量比值),其表达式如下:

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + 1/R_{xj}} \quad (2)$$

式中: $R_{xj}$  为第  $j$  土地利用类型栅格  $x$  的 Budyko 干燥指数; $\omega_x$  表示植被有效含水量与年均降水量的比值:

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} \quad (3)$$

$$R_{xj} = \frac{K_{xj} ET_{0x}}{P_x} \quad (4)$$

$$AWC_x = \text{Min}(D_s, D_r) \times PAWC_x \quad (5)$$

式中:  $AWC_x$  为栅格  $x$  的植被有效含水量 (mm) (由有效土层深度和土壤质地决定);  $Z$  为季节参数 (即 Zhang 系数) 用于表征降水的季节性特征;  $K_{xj}$  为第  $j$  土地利用类型栅格  $x$  的植被蒸散系数;  $ET_{0x}$  表示栅格  $x$  的潜在蒸散量 (mm);  $D_s$  为土层深度 (mm);  $D_r$  为根系深度 (mm);  $PAWC_x$  为栅格单元  $x$  的植物可利用水含量 (mm), 植物可利用含水量 PAWC 可以通过土壤质地以及土壤有机质含量计算得到, 其表达公式如下:

$$\begin{aligned} PAWC = & 54.509 - 0.132 \times \text{sand}\% - \\ & 0.003(\text{sand}\%)^2 - 0.055 \times \text{silt}\% - \\ & 0.006(\text{silt}\%)^2 - 0.738 \times \text{clay}\% + \\ & 0.007(\text{clay}\%)^2 - 2.688 \times \text{OM}\% + \\ & 0.501(\text{OM}\%)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\text{sand}\%$ ,  $\text{silt}\%$ ,  $\text{clay}\%$  分别表示土壤砂粒、粉粒、黏粒的比例;  $\text{OM}\%$  则表示土壤有机质含量。

### 3 结果与分析

#### 3.1 南北盘江流域产水量的时空变化特征

应用 InVEST 模型产水模块对南北盘江流域 2005—2020 年产水量进行评估, 以 2005 年为基准年,  $Z$  参数以年为尺度, 不考虑季节变化。根据贵州、云南、广西三省的水资源公报流域实测站点数据, 经模拟计算, 发现当  $Z$  值为 30 时, InVEST 产水模块模拟值效果最佳。

根据模拟结果, 南北盘江流域 2005—2020 年平均降雨量和平均产水总量分别为  $1\,162.1, 677.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 平均产水深度为 828.0 mm。从空间分布格局来看 (图 2), 南北盘江流域产水量在 2005—2020 年空间分布格局与降雨量均相似, 这与南北盘江流域降水分布东北多西南少、实际蒸散量分布东北少西南多, 以及土地覆盖类型变化差异有着密切的关系, 主要呈现为东北部和中部高、西南部低的趋势。产水量高值区主要集中于流域中部及东北部, 即贵州省境内的安龙县、贞丰县、兴仁县、盘州市和云南省境内的富源县、罗平县一带; 而区域产水量低值区主要集中于流域西南部, 即云南省境内的通海、丘北、华宁县以及江川县一带。

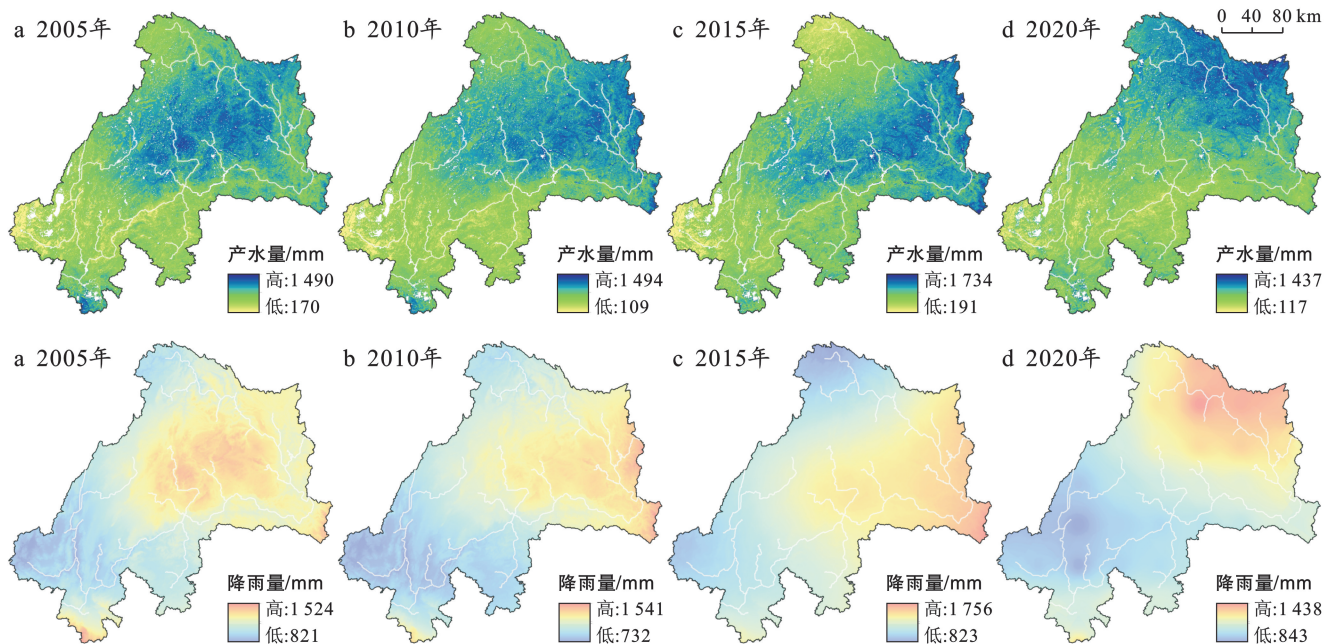


图 2 2005—2020 年南北盘江流域产水量及降雨量分布

Fig.2 Water yield and rainfall distribution in Nanbei Panjiang River basin from 2005 to 2020

从时间尺度来看 (图 3), 2005—2020 年, 南北盘江流域平均总产水量变化趋势表现为先减小后增大, 再减小的波动变化。2005—2010 年, 产水深度小幅度减小, 减小幅度为 10.1%; 2010—2015 年, 产水深度明显增加, 增加幅度约为 19.3%; 2015—2020 年,

产水深度大幅度减小, 减少量为 177.8 mm (19.3%)。总体来看, 产水量呈现出在 828.3 mm 上下幅度 20.0% 之间波动趋势, 2005 年和 2015 年产水量处于高水平状态, 2010 年和 2020 年产水量处于低水平状态。

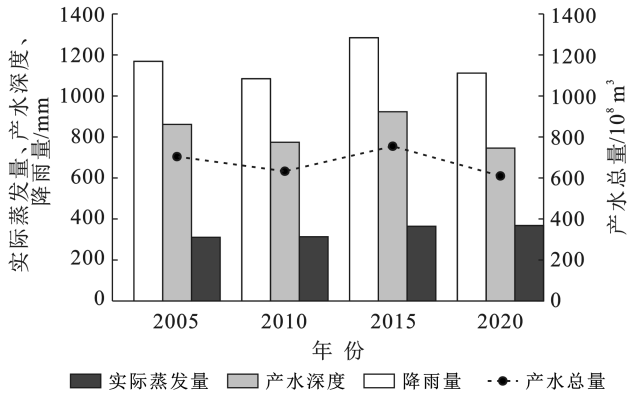


图3 2005—2020年南北盘江流域产水深度、降雨量、产水总量以及实际蒸发量

Fig.3 Water yield depth, rainfall, total water yield and actual evaporation in Nanbei Panjiang River basin from 2005 to 2020

2005—2010年(图4a),流域内年平均产水深度显著减小面积约占研究区总面积的46.9%,产水量减小区域主要集中在研究区中部和南部边缘地带;增加区域较小,约占研究区面积的2.8%,主要集中在西部边缘地带。2010—2015年(图4b),在产水量显著增加期间,其产水量增加面积约占研究区总面积的69.9%,增加区域分布于整个研究区,产水量减少区域仅分布于研究区北角处(3.8%)。2015—2020年(图4c),以极显著减小与显著减小为主面积约占研究区总面积的70.7%,其空间格局与2010—2015年相反,减小区域分布于整个研究区。总体而言,2005—2020年(图4d),产水量极显著减小区域约占整个研究区的11.7%,主要集中在研究区中部,约9.8%的产水量显著增加区域分布于研究区的北部。结果表明,2005—2020年南北盘江流域产水能力在空间分布上呈现出由西南向东北递增。

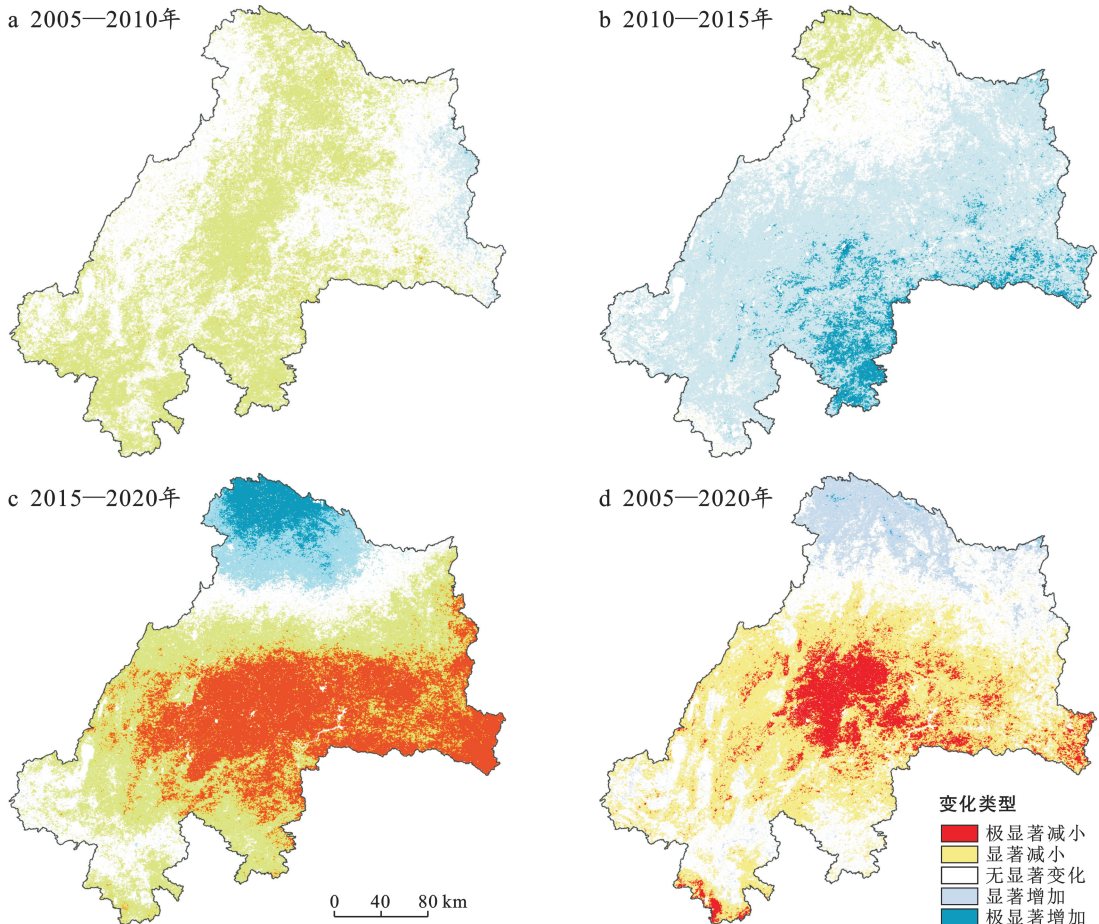


图4 2005—2020年南北盘江流域产水量年际变化

Fig.4 Interannual variation of water yield in Nanbei Panjiang River basin from 2005 to 2020

### 3.2 不同土地利用类型下的产水功能差异

产水总量在受产水面积和单位面积产水能力的双重约束之下,在不同的土地利用类型上也存在区别。以2020年为例(表2),南北盘江流域的主要土地

利用类型为林地、耕地和草地,三者都具有较高的产水能力,分别占研究区总面积的52.6%,24.8%和14.5%。通过产水贡献率(即不同土地利用类型的产水总量与流域的总产水总量的比值)来衡量不同土地

利用类型的产水总量贡献。因此,林地、耕地和草地是南北盘江流域产水总量的主要贡献者,为整个南北盘江流域提供了 96.4%的产水总量,建设用地提供了研究区 3.0%的产水总量,湿地、水域、裸地以及永久冰

雪的产水总量比例共为 0.6%(图 5)。根据 InVEST 模型《用户指南》,模型自身将湿地、建设用地、水域、永久冰雪赋值为非植被覆盖地类(表 1),故除建设用地之外的非植被覆盖地类不在本研究讨论范围内。

表 2 2005—2020 年南北盘江流域各土地利用类型转移矩阵变化率

Table 2 Change rate of transfer matrix of land use types in Nanbei Panjiang River basin from 2005 to 2020

项目	2005 年面积变化率/%											合计
	耕地	常绿阔叶林	落叶阔叶林	常绿针叶林	灌林地	草地	湿地	建设用地	裸地	水域	永久冰雪	
耕地	<b>24.14</b>	0.32	0.32	0.20	0.26	0.20	0.00	0.68	0.00	0.04	0.00	26.16
常绿阔叶林	0.05	<b>9.75</b>	0.08	0.11	0.07	0.01	—	0.01	0.00	—	—	10.07
落叶阔叶林	0.07	0.11	<b>15.51</b>	0.09	0.05	0.04	—	0.01	0.00	—	—	15.88
常绿针叶林	0.25	0.10	0.12	<b>25.57</b>	0.04	0.21	—	0.05	0.00	0.02	0.00	26.34
灌林地	0.02	0.10	0.03	0.01	<b>3.91</b>	0.01	0.00	—	0.00	—	—	4.08
草地	0.31	0.01	0.07	0.17	0.01	<b>14.07</b>	0.00	0.19	0.00	0.01	0.00	14.84
湿地	—	—	—	—	—	—	<b>0.00</b>	—	—	—	—	0.00
建设用地	—	—	—	—	—	—	—	<b>1.69</b>	—	—	—	1.69
裸地	—	—	—	—	—	—	—	—	<b>0.00</b>	—	—	0.00
水域	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.92</b>	—	0.94
永久冰雪	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<b>0.00</b>	0.00
合计	24.86	10.38	16.12	26.15	4.33	14.52	0.00	2.63	0.00	1.00	0.00	100

注:“—”表示该土地利用类型没有发生变化;“0.00”代表该土地利用类型发生变化且转换率较小;粗体数值为未发生变化的土地利用类型的保留率。

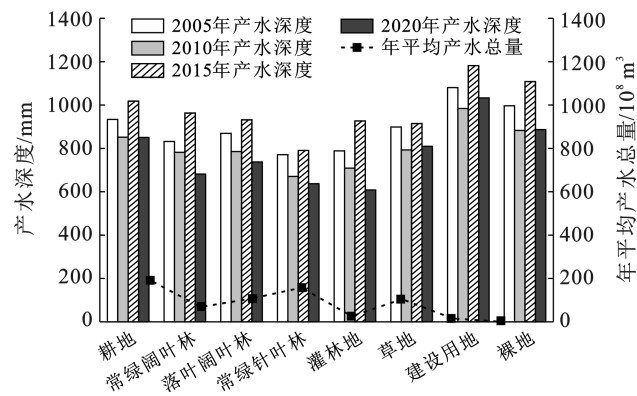


图 5 2005—2020 年南北盘江流域各土地利用类型年产水深度及产水总量变化

Fig.5 Changes of annual water yield depth and total water yield of different land use types in Nanbei Panjiang River basin from 2005 to 2020

由图 5 可知,在时间变化上,除耕地、草地、裸地和建设用地外,其余土地利用类型的年产水深度与研究区整体变化相似,即表现为先减小后增大,再减小的波动变化。总体看来,以 2020 为例,产水能力强弱表现为:建设用地(1033 mm) > 裸地(887 mm) > 耕地(851 mm) > 草地(810 mm) > 落叶阔叶林(738 mm) > 常绿阔叶林(682 mm) > 常绿针叶林(637 mm) > 灌木林(608 mm)。其中,根据产水模块机理,产水量与蒸散量成反比关系,建设用地面积约占研究区面积

2.6%,主要以不透水面为主,植被覆盖度低,导致其蒸散量小,因此具有较高的产水能力;耕地的表层土壤由于长期受人类活动影响呈现出退化、板结、孔隙度降低,导致其产水能力略高。自“十五”计划实施以来,正式全面启动退耕还林(草)生态工程,研究区耕地面积持续减少,林地面积持续增加,但草地面积持续减少。林草覆盖率由 2005 年的 71.2% 上升至 2020 年的 71.5%,约增加了 244.31 km<sup>2</sup>,但由于草地面积减少了 259.22 km<sup>2</sup>,约为林地增加面积的二分之一,且草地产水能力优于林地,导致林草部分的产水总量减少了 7.62 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>;同时,耕地面积持续减少,产水总量减少了 2.45 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>。因此,耕地与草地面积减少是导致流域内产水总量呈现出小幅波动下降趋势的主要原因之一。

由表 3 可知,2005—2020 年,研究区内耕地、草地以及常绿阔叶林面积均呈现出不同程度的下降趋势。其中耕地面积持续减少最严重,约为 1063.4 km<sup>2</sup>,减小幅度为 5.0%;草地、常绿针叶林面积分别缩减了 259.2 m<sup>2</sup>,157.9 km<sup>2</sup>,减幅分别达到了 2.1% 和 0.7%。建设用地面积持续增加,约为 770.5 km<sup>2</sup>,增加幅度为 55.7%;常绿阔叶林、灌林地、落叶阔叶林以及裸地面积增幅分别为 3.1%,6.2%,1.5% 和 44.8%。表明南北盘江流域在城市化的进程中,大量的耕地转变

为建设用地,加上退耕还林(草)生态工程的实施,还有一部分耕地转换为常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、草地以及灌林地,导致耕地面积持续减少。受人类耕作影响下,草地主要转换为耕地和建设用

地,常绿针叶林主要转换为耕地,且草地与常绿针叶林受人类耕作影响转出面积,大于受生态修复工程影响转入面积,导致草地与常绿针叶林面积均呈现出小幅度下降趋势。

表 3 2005—2020 年南北盘江流域各土地利用类型面积变化及变化率

Table 3 Area change and change rate of each land use type in Nanbei Panjiang River basin from 2005 to 2020

土地利用类型	2005—2010 年		2010—2015 年		2015—2020 年		2005—2020 年	
	面积变化/ km <sup>2</sup>	变化率/ %	面积变化/ km <sup>2</sup>	变化率/ %	面积变化/ km <sup>2</sup>	变化率/ %	面积变化/ km <sup>2</sup>	变化率/ %
耕地	-351.64	-1.64	-417.19	-1.98	-294.57	-1.43	-1 063.40	-4.97
常绿阔叶林	71.78	0.87	94.38	1.14	88.73	1.06	254.90	3.10
落叶阔叶林	42.67	0.33	73.64	0.57	83.28	0.64	199.59	1.54
常绿针叶林	17.92	0.08	-83.03	-0.39	-92.82	-0.43	-157.93	-0.73
灌林地	55.85	1.67	64.21	1.89	86.90	2.51	206.97	6.20
草地	-108.27	-0.89	-53.45	-0.44	-97.50	-0.81	-259.22	-2.14
湿地	0.07	2.49	0.29	9.99	0.18	5.66	0.55	19.12
建设用地	253.59	18.33	311.91	19.05	204.96	10.52	770.46	55.69
裸地	0.04	7.08	0.06	11.16	0.14	21.66	0.24	44.81
水域	17.96	2.34	9.14	1.16	20.64	2.60	47.74	6.23
永久冰雪	0.02	14.58	0.02	11.36	0.03	15.10	0.08	46.87

### 3.3 不同海拔下的产水量功能差异

研究区海拔分布规律呈现自西北向东南递减的趋势,与产水量能力空间分布特征呈现出明显的差异性。云贵高原属于中国地形的第二阶梯,海拔主要在 1~2 km 之间,将研究区高程(图 6a)分为低、中、高、较高海拔 4 个级别,海拔等级呈正态分布,即海拔小于 900 m 的面积占比为 8.33%,900~1 400 m (24.02%),1 400~1 900 m (39.19%),海拔大于

1 900 m 的面积比例为 28.45%,其产水总量贡献率分别为 9.83%,26.68%,37.97%和 25.52%。在海拔 1 400~1 900 m 之间的面积比例与产水总量贡献率最大,海拔小于 900 m 的面积比例与产水总量贡献率最小;就平均产水深度而言(图 7),随着海拔等级升高而逐渐降低,低、中海拔区域具有较强的产水能力,高、较高海拔区域的产水能力相对较弱。其中,海拔小于 900 m 的产水深度最大,约为 1 068.57 mm。

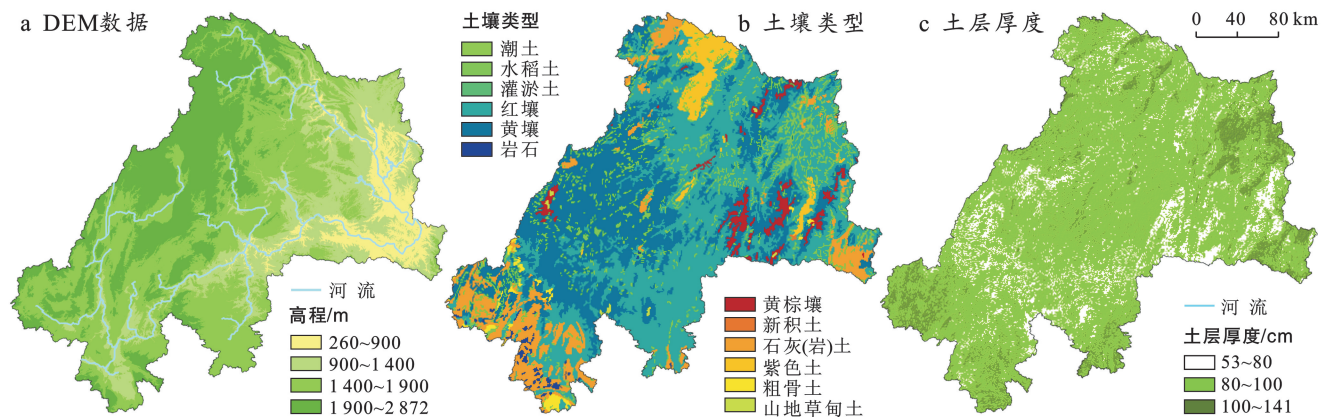


图 6 南北盘江流域 DEM 数据、土壤类型以及土层厚度

Fig.6 DEM data, soil type and soil thickness in Nanbei Panjiang River basin

### 3.4 不同土壤类型下的产水量功能差异

如图 8 所示,在土壤类型上,产水能力的大小依次为:黄棕壤>水稻土>红壤>黄壤>紫色土>石灰(岩)土。红壤与黄壤是流域内地带性土壤,集中连片分布于流域中部和西部,占研究区总面积比例较大,

分别为 40.44% 和 32.72%;其次主要为水稻土(9.76%)、石灰(岩)土(9.42%)、紫色土(3.49%)以及黄棕壤(2.45%)等。本文仅考虑面积比例较大的土壤类型,其产水总量贡献率分别为红壤(43.12%)、黄壤(33.70%)、水稻土(9.33%)、石灰(岩)土(7.95%)、

紫色土(3.08%)和黄棕壤(2.81%)。红壤和黄壤所含有机质、铁铝含量高,土壤肥力条件较好,耐旱保肥,适宜植被生长;石灰(岩)土和紫色土属于初育土,植被大多较为稀疏。大部分土壤的涵蓄降水量能力随土层厚度增加而增加,根据《国家森林资源连续清查主要技术规定(2003年10月修订版)》,将研究区土层厚度(图6c)划分为薄(0—80 cm)、中(80—100 cm)和厚( $\geq 100$  cm)3个厚度级别,研究区土层厚度主要以中级厚度为主,包含了研究区内大部分红壤与黄壤,使得流域内土壤的涵蓄降水量能力保持在一定水平上。

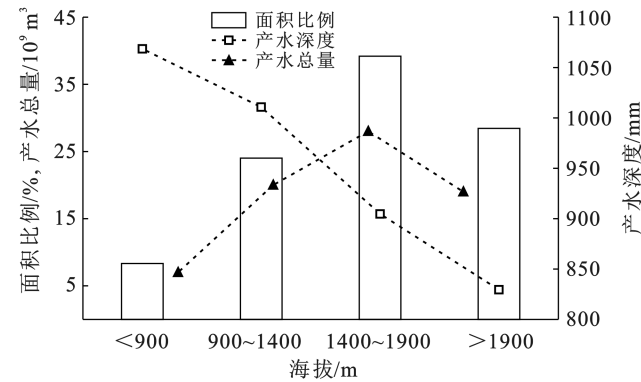


图7 南北盘江流域不同海拔的面积比例、产水差异和产水总量  
Fig.7 Area proportion, water yield difference and total water yield at different altitudes in Nanbei Panjiang River basin

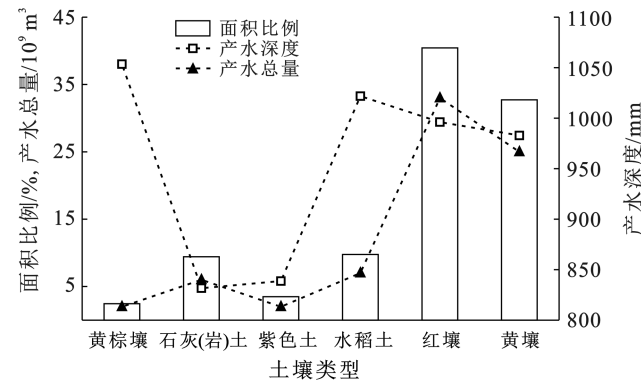


图8 南北盘江流域不同土壤类型的面积比例、产水差异和产水总量  
Fig.8 Area proportion, water yield difference and total water yield of different soil types in Nanbei Panjiang River basin

### 3.5 各要素对产水功能的综合影响

由图9可知,流域内植被在海拔上呈现出明显的垂直地带性。常绿阔叶林与灌林地的面积占比随海拔等级升高而降低;常绿针叶林与草地相反,其面积占比在海拔等级上呈“倒金字塔”状分布;常绿阔叶林的面积占比呈“衰退型”分布;耕地面积占比在各级海拔均约为四分之一,属于“稳定型”分布。由图10可

知,除低海拔( $< 900$  m)外,红壤与水稻土面积占比随海拔等级升高而降低,黄壤面积占比随海拔等级升高而增加;初育土(包含石灰土和紫色土)面积占比随海拔等级升高而增加。在低、中海拔区域内,产水能力较强的耕地、落叶阔叶林与常绿阔叶林面积占比较大,常绿针叶林占比较小,且产水能力较差的初育土面积占比最小,红壤面积占比较大,是导致低、中海拔区产水能力偏高的主要原因之一;在高、较高海拔区域内,产水能力较弱的常绿针叶林面积占比最大,落叶阔叶林与常绿阔叶林面积占比较小,且初育土面积占比增大,红壤面积占比减小,是导致高、较高海拔区产水能力偏低的主要原因之一。虽然建设用地和裸地的产水能力较强,但其总面积较小,对区域的整体产水能力影响可忽略不计。

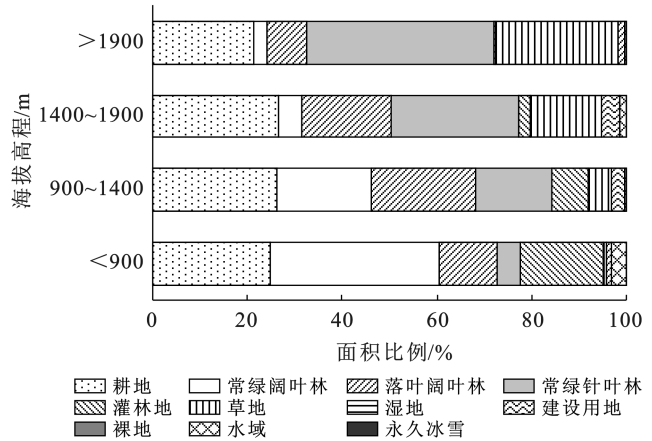


图9 南北盘江流域不同海拔等级下的土地利用类型比例  
Fig.9 Proportion of land use types at different altitudes in Nanbei Panjiang River basin

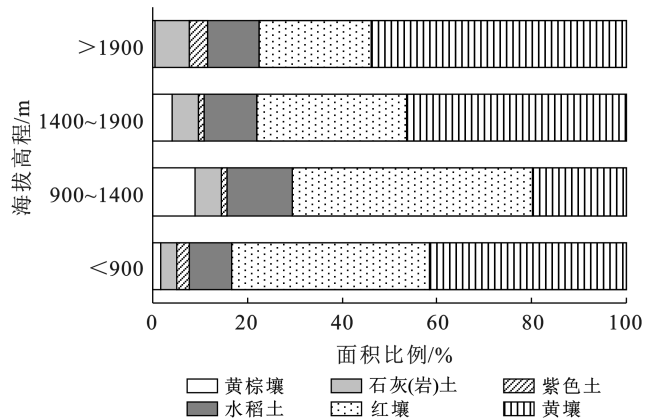


图10 南北盘江流域不同海拔等级下的土壤类型比例  
Fig.10 Proportion of soil types at different altitudes in Nanbei Panjiang River basin

综合各方面因素,流域东北部和中部区域在空间上属于降雨量的高值区,位于低、中海拔区域,落叶阔叶林与常绿阔叶林面积占比较大,常绿针叶林占比较



小,且土壤类型主要以产水能力较强的黄壤和红壤为主。流域西南部区域是降雨量的低值区,位于高海拔区域,常绿针叶林面积比例较大,落叶阔叶林与常绿阔叶林面积比例较小,且分布着大量产水能力较弱的石灰(岩)土和紫色土,使得2005—2020年南北盘江流域产水格局均呈现出东北部和中部高、西南部低的趋势。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

南北盘江流域产水量年际间的波动与气候变化有密切关系,而降水量在时空分异特征上与产水量呈显著正相关关系。研究显示流域产水量存在峰值和低谷。臧文斌等<sup>[35]</sup>和贺敏等<sup>[36]</sup>基于数据表明西南地区2015年降雨量充沛,2020年降雨量较少,与该流域产水量年际间的波动变化相吻合。流域由于地形西高东低,夏季携带大量水汽的气流受地形抬升作用下,在流域东北部凝结降落,使该流域降雨量空间分布格局呈现出自东北向西南递减,与莫旭昱等<sup>[37]</sup>对南北盘江流域降水的空间格局分析结果相一致。流域产水能力随着海拔升高而逐降低,这与谢余初等<sup>[11]</sup>在白龙江流域研究结果相似,与王晓峰等<sup>[38]</sup>在秦岭地区研究的结果相反,是因为白龙江流域是秦岭的子流域之一,因研究尺度不同所导致的规律差异。一方面,二者面积上差距大;另一方面,对应的海拔产水功能含义有所区别,前者将流域视为整体,再对海拔进行划分,而后者将流域视为整体的同时,再进行子流域划分,以子流域为研究单元研究。

本研究以年为尺度对该流域产水量进行模拟,模拟结果基本符合区域的实际情况,但侧重于分析自然因子对产水服务的影响,忽略了社会因子的影响。同时,因模型自身设定及数据精度、未考虑流域产水的年内变化等原因,在一定程度上会影响模型的模拟精度。但产水量的基本格局不会改变,该研究成果仍然能较好地反映出南北盘江流域产水量的时空变化特征及趋势,从而为南北盘江流域水资源的有效管理、合理利用与保护提供了科学依据。后续的研究中可从小尺度着手,在明晰流域总体产水量时空格局的基础上进一步挖掘异常或者特殊区域产水服务的特殊时空变化规律。同时,产水量仅是流域内生态系统服务中的一项指标,应综合考虑各项服务效益,科学地去权衡各服务之间的关系。

### 4.2 结论

(1)从空间分布格局来看,南北盘江流域产水强度高值区有向东、东北偏移的趋势。总体产水格局维

持与降水量的空间吻合性,呈现出东北部和中部高、西南部低的趋势。产水量高值区主要位于贵州省境内的安龙县、贞丰县、兴仁县和盘州特区和云南省境内的富源县、罗平县一带,产水量低值区则主要集中于云南省境内的通海县、丘北县、华宁县和江川县一带。2005—2020年,该流域的平均产水总量与降水量在时间上具有一致性,整体呈现出先减小后增大,再减小的小幅波动下降趋势。

(2)在土地利用类型方面,林地、耕地和草地是南北盘江流域产水总量的主要贡献者,提供了整个南北盘江流域总产水量的92.8%;产水能力大小依次为:建设用地>裸地>耕地>草地>落叶阔叶林>常绿阔叶林>常绿针叶林>灌木林。期间,建设用地与林地面积持续增加,耕地和草地面积持续减小;在城市化进程与人类活动影响下,主要的土地转变方式:耕地主要转变为建设用地、林地和草地;草地主要转变为耕地和建设用地;林地主要转变为耕地和草地。

(3)在垂直梯度上,流域产水能力随着海拔升高而逐降低。在土壤类型上,产水能力的大小依次为:黄棕壤>水稻土>红壤>黄壤>紫色土>石灰(岩)土,红壤和黄壤是流域内面积最大的地带性土壤,是流域内产水总量稳定的重要保障。自“十五”期间全面启动退耕还林(草)生态工程以来,研究区耕地、草地面积持续减少。在不考虑降雨量显著变化的情况下,耕地与草地面积减少是导致流域内产水总量呈现出小幅波动下降趋势的主要原因。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Song Fengjiao, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. A new indicator for global food security assessment: Harvested area rather than cropland area [J]. Chinese Geographical Science, 2022,32(2):204-217.
- [2] Turner R K, Daily G C. The ecosystem services framework and natural capital conservation [J]. Environmental and Resource Economics, 2008,39(1): 25-35.
- [3] Finlayson M, Cruz R D, Davidson N, et al. Millennium ecosystem assessment: ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis [J]. Data Fusion Concepts & Ideas, 2005,656(1):87-98.
- [4] 吕一河,胡健,孙飞翔,等.水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务[J].生态学报,2015,35(15):5191-5196.
- [5] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services [J]. Ecology Letters, 2009,12(12):1394-1404.
- [6] 张彪,李文华,谢高地,等.北京市森林生态系统的水源涵养功能[J].生态学报,2008,28(11):5619-5624.

- [7] 辛琨,肖笃宁.盘锦地区湿地生态系统服务功能价值估算[J].生态学报,2002,22(8):1345-1349.
- [8] Chen Fei, Bai Xiaoyong, Liu Fang, et al. Analysis long-term and spatial changes of forest cover in typical karst areas of China [J]. Land, 2022,11(8):1349.
- [9] Li Chaojun, Bai Xiaoyong, Tan Qiu, et al. High-resolution mapping of the global silicate weathering carbon sink and its long-term changes [J]. Global Change Biology, 2022,28(14):4377-4394.
- [10] Liu Min, Bai Xiaoyong, Tan Qiu, et al. Climate change enhances the positive contribution of human activities to vegetation restoration in China [J]. Geocarto International, 2022,37(26):13479-13499.
- [11] 谢余初,巩杰,齐姗姗,等.基于 InVEST 模型的白龙江流域水源供给服务时空分异[J].自然资源学报,2017,32(8):1337-1347.
- [12] 张灿强,李文华,张彪,等.基于土壤动态蓄水的森林水源涵养能力计量及其空间差异[J].自然资源学报,2012,27(4):697-704.
- [13] 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.
- [14] 周佳雯,高吉喜,高志球,等.森林生态系统水源涵养服务功能解析[J].生态学报,2018,38(5):1679-1686.
- [15] Moreira M, Fonseca C, Vergilio M, et al. Spatial assessment of habitat conservation status in a Macaronesian Island based on the InVEST model: A case study of Pico Island (Azores, Portugal) [J]. Land Use Policy, 2018,78:637-649.
- [16] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013,165:6-18.
- [17] Marquès M, Bangash R F, Kumar V, et al. The impact of climate change on water provision under a low flow regime: A case study of the ecosystems services in the Francoli River basin [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013,263:224-232.
- [18] Bastola, Jeong Y J, Hyup S. Water yield estimation of the Bagmati Basin of Nepal using GIS based InVEST model [J]. Journal of Korea Water Resources Association, 2019,52(9):637-645.
- [19] 赵筱青,石小倩,李驭豪,等.滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J].地理学报,2022,77(3):736-756.
- [20] 包玉斌,李婷,柳辉,等.基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J].地理研究,2016,35(4):664-676.
- [21] 张福平,李肖娟,冯起,等.基于 InVEST 模型的黑河流域上游水源涵养量[J].中国沙漠,2018,38(6):1321-1329.
- [22] 潘韬,吴绍洪,戴尔阜,等.基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J].应用生态学报,2013,24(1):183-189.
- [23] 戴尔阜,王亚慧,横断山区产水服务空间异质性及归因分析[J].地理学报,2020,75(3):607-619.
- [24] 陈文贵.南北盘江地区水土流失危害与防治对策[J].水土保持研究,2000,7(3):101-103.
- [25] 刘璐璐,曹巍,贺添,等.南北盘江流域土壤侵蚀时空动态变化及影响因素分析[J].中国水土保持科学,2019,17(6):69-77.
- [26] 安和平,周家维.贵州南、北盘江流域土壤侵蚀现状及防治对策[J].水土保持学报,1994,8(3):36-45.
- [27] 韩会庆,罗绪强,游仁龙,等.基于 InVEST 模型的贵州省珠江流域水质净化功能分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(5):87-92.
- [28] 赵良杰,王莹,周妍,等.基于 SWAT 模型的珠江流域地下水资源评价研究[J/OL].地球科学. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220119.1634.006.html>
- [29] 周雪欣,罗昊.基于 GIS 与 RS 技术的北盘江流域生态环境质量评价研究[J].环境科学与管理,2018,43(7):178-182.
- [30] 窦小东,彭启洋,张万诚,等.基于情景分析的 LUCC 和气候变化对南盘江流域径流的影响[J].灾害学,2020,35(1):84-89.
- [31] 王亚茹.SWAT 模型优化与土地利用变化的径流效应研究:以南北盘江流域为例[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
- [32] 马阔,吴起鑫,韩贵琳,等.南、北盘江流域枯水期水化学特征及离子来源分析[J].中国岩溶,2018,37(2):192-202.
- [33] 顾铮鸣,金晓斌,沈春竹,等.近 15 a 江苏省水源涵养功能时空变化与影响因素探析[J].长江流域资源与环境,2018,27(11):2453-2462.
- [34] 孙艳伟,李加林,马仁锋,等.于桥水库流域水源供给服务的空间分布格局[J].水资源与水工程学报,2015,26(6):1-6.
- [35] 臧文斌,阮本清,李景刚,等.基于 TRMM 降雨数据的西南地区特大气象干旱分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2010,8(2):97-106.
- [36] 贺敏,宋立生,王展鹏,等.基于多源数据的干旱监测指数对比研究:以西南地区为例[J].自然资源学报,2018,33(7):1257-1269.
- [37] 莫旭显,张勇,秦雨,等.南北盘江流域降水的时空变化分析[J].云南地理环境研究,2012,24(1):7-11.
- [38] 王晓峰,符鑫鑫,楚冰洋,等.秦岭生态屏障产水服务时空演变特征及驱动要素[J].自然资源学报,2021,36(10):2507-2521.