

## 低丘缓坡建设开发对水源涵养功能的影响

石雅馨, 张洪\*, 郭润展 (云南财经大学城市与环境学院, 云南昆明 650221)

**摘要** 运用 InVEST 模型并结合实地调研结果, 对云南 10 个典型低丘缓坡建设项目区开发前后生态系统水源涵养功能进行定量测算, 比较分析不同类型项目区水源涵养功能的差异。结果表明, 开发后项目区平均产水量和平均产水深度均低于开发前, 城市建设区的产水总量高于工业区, 下降程度也高于工业区; 大部分项目区水源涵养总量均低于开发前, 仅光华项目区水源涵养总量高于开发前, 城市建设区的水源涵养总量高于工业区, 工业区水源涵养量下降程度高于城市建设区; 导致项目区开发前后水源涵养量变化的原因有土地利用结构、植被、地形、径流、降水、土壤等自然和人为因素, 其中受土地利用类型影响较大; 低丘缓坡开发导致区域生态环境受到干扰和破坏, 但不同的开发模式和功能定位对其影响存在差异。因此在低丘缓坡开发过程中, 应采取工程、监管、法律和经济等综合措施, 实现低丘缓坡开发建设与生态保护的协调。

**关键词** 低丘缓坡; 建设开发; 水源涵养; InVEST 模型

中图分类号 S157.1 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)21-0070-09

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.21.018



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Effect of Construction and Development of Low Hills and Gentle Slopes on Water Conservation Function

SHI Ya-xin, ZHANG Hong, GUO Run-zhan (School of Urban and Environment, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming, Yunnan 650221)

**Abstract** Using the InVEST model and the results of field investigations, the water conservation functions of the ecosystems before and after the development of 10 typical low-hill and gentle slope construction project areas in Yunnan were quantitatively measured, and the differences in water conservation functions of different types of project areas were compared and analyzed. The results show that the average water production and average water production depth in the project area after development are lower than before development, the total water production of urban construction areas was higher than that of industrial areas, and the decrease degree was also higher than that in industrial areas. The total amount of water conservation in most project areas is lower than before the development. Only the total amount of water conservation in the Guanghua project area was higher than that before the development, the total amount of water conservation in urban construction areas was higher than that in industrial areas, and the decline in water conservation in industrial areas was higher than that in urban construction areas. The reasons for the changes in water conservation before and after the development of the project area are natural and human factors such as land use structure, vegetation, topography, runoff, precipitation and soil, among which the land use type had a greater impact. The development of low hills and gentle slopes had caused disturbance and destruction of the regional ecological environment, but different development models and functional positioning had different impacts on them. Therefore, in the development process of low hills and gentle slopes, comprehensive measures such as engineering, supervision, law and economy should be adopted to realize the coordination of the development and construction of low hills and gentle slopes with ecological protection.

**Key words** Low hills and gentle slopes; Construction and development; Water conservation; InVEST model

生态系统的水源涵养功能主要体现在改善水文状况、调节区域水分循环等方面<sup>[1]</sup>。生态系统中的植被如森林、灌丛、草地对水源涵养功能发挥着巨大的作用, 其通过林冠层截留、枯枝落叶层持水和土壤层蓄水来调节地表径流和补充地下水, 在防治旱涝灾害、净化水质等方面具有至关重要的作用<sup>[2]</sup>。生态系统服务和权衡的综合评估模型(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST)从水文角度以中小尺度流域单元为对象, 反映不同气候状况、土地利用、地形起伏、土壤性质下的产水量大小, 功能模型以地图形式表达了流域的产水能力, 间接地对区域的自然价值赋予了适当的衡量标准, 而数据与参数的适宜性成为模型结果是否可信的关键<sup>[3]</sup>。近年来国内学者将 InVEST 模型广泛运用于北京山区、陕北黄土高原、秦岭地区、横断山区、若尔盖高原等山地<sup>[4-8]</sup>, 均取得较好的应用效果。国外学者将 InVEST 模型广泛应用于美国、英国等国家和地区的产水量计算中<sup>[9-11]</sup>。

目前, 国内关于生态系统服务的研究报道较多, 但对整

个云南低丘缓坡生态系统服务的研究较少且时序较早。陈武强等<sup>[12]</sup>研究昆明西华湿地公园水分调节量和价值, 赵元藩等<sup>[13]</sup>估算玉溪市森林生态系统涵养水源量和调节水量价值, 杨芳等<sup>[14]</sup>评估玉龙县天保工程森林生态系统水源涵养能力, 都是从宏观上估算了区域的水源涵养能力以及为保护环境创造的价值。云南省山地面积占全省土地面积的 90% 以上, 地质环境复杂, 生态环境多样。山地环境具有空间异质性和垂直分异性, 海拔、地形起伏和土地覆被在一定的空间尺度上镶嵌复合。水循环受土地利用、气候、地形、土壤、植被等自然和人为因素的复杂影响, 如何量化这种水源涵养能力, 仍是一个悬而未决的问题<sup>[15]</sup>。鉴于上述原因, 笔者针对气候、地形、土壤、土地利用对山地水循环的影响, 采用 InVEST 产水量模型与地形指数、土壤饱和导水率、流速系数相结合的方法, 估算研究区水源涵养能力, 旨在揭示低丘缓坡综合开发前后水源涵养功能的时空变化与影响因素, 为低丘缓坡合理开发和水资源保护提供科学依据。

## 1 资料与方法

**1.1 研究区概况** 该研究在选取研究区时, 主要考虑的是功能定位、地理位置、气候类型和开发情况 4 个因素, 具体理由如下: ①功能定位, 依据功能定位, 项目区大致可分为

**基金项目** 国家自然科学基金项目(71764034)。

**作者简介** 石雅馨(1996—), 女, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 研究方向: 土地利用规划。\*通信作者, 二级教授, 博士生导师, 从事城市发展与土地利用研究。

**收稿日期** 2021-06-17

2 种类型,一类是以加工、能源、仓储物流、高新技术为主的工业区,且具有特色产业;另一类是集旅游、康养、居住等功能的城市建设区。②地理位置,该研究根据地理区位划分,从滇中选择 6 个,滇西选择 2 个,滇南选择 2 个项目区。③气候类型,云南省大部分地区属于亚热带季风气候,滇南部分地区属于热带季风气候。为了避免气候类型对结果产生较大影响,该研究所选项目区 8 个属于亚热带季风气候,景洪的光华和景大项目区属于热带季风气候。④开发情况,

对项目区进行实地调研,选择开发程度较高的项目区进行研究。

研究区位于云南省昆明市、曲靖市、玉溪市、大理白族自治州和西双版纳傣族自治州(表 1 和图 1)。研究区面积在 550.98~2 158.40 hm<sup>2</sup>,研究区内土壤类型多样,有水稻土、暗黄棕壤、黄棕壤、红壤、山原红壤、赤红壤、砖红壤、褐红土。植被类型丰富,主要为阔叶林、针叶林、针阔混交林、阔叶灌丛、灌草丛和山地草甸。

表 1 研究区概况

Table 1 Overview of the study area

序号 No.	项目区名称 Project area name	面积 Area/hm <sup>2</sup>	功能定位 Functional positioning
1	昆明市西山区长坡项目区	583.81	汽配城、商贸物流园
2	昆明市宜良北古城项目区	1 209.58	水泥建材、饲料加工和制造加工生产基地
3	曲靖市麒麟区高家屯—窦家冲项目区	649.62	电铅、粗铅等工业生产基地,发展光电子产业等新能源产业基地和仓储物流中心
4	曲靖市富源县中安—后所项目区	597.30	以冶金及机械加工制造、煤化工及其延伸产业为支撑的综合型产业区
5	玉溪市红塔区观音山项目区	1 281.61	新能源、生物制药业、仓储物流业、机械工业、卷烟配套、高档石材加工、冶金、铸造业等现代化科技工业区
6	昆明市五华区沙朗项目区	550.98	以会议会展为依托,以旅游居住用地为支撑,以旅游、休闲度假产业为先导,辅以商业、养老等产业的山地新城区
7	大理市下和—上登项目区	2 158.40	以休闲度假、滨海旅游、生态观光、生态工业、仓储物流和文化体育开发建设为主要内容的现代山地新城区
8	大理市塔宝山—大湖西项目区	619.76	环保型养生居住、运动康复、抗衰老理疗、度假休闲娱乐等为一体的运动康复及抗衰老理疗国家级示范基地,商贸物流城市综合体
9	西双版纳景洪市景大项目区	1 069.55	休闲度假养生区
10	西双版纳景洪市光华项目区	1 274.48	集高端商务、休闲度假、山地居住于一体的综合性项目区

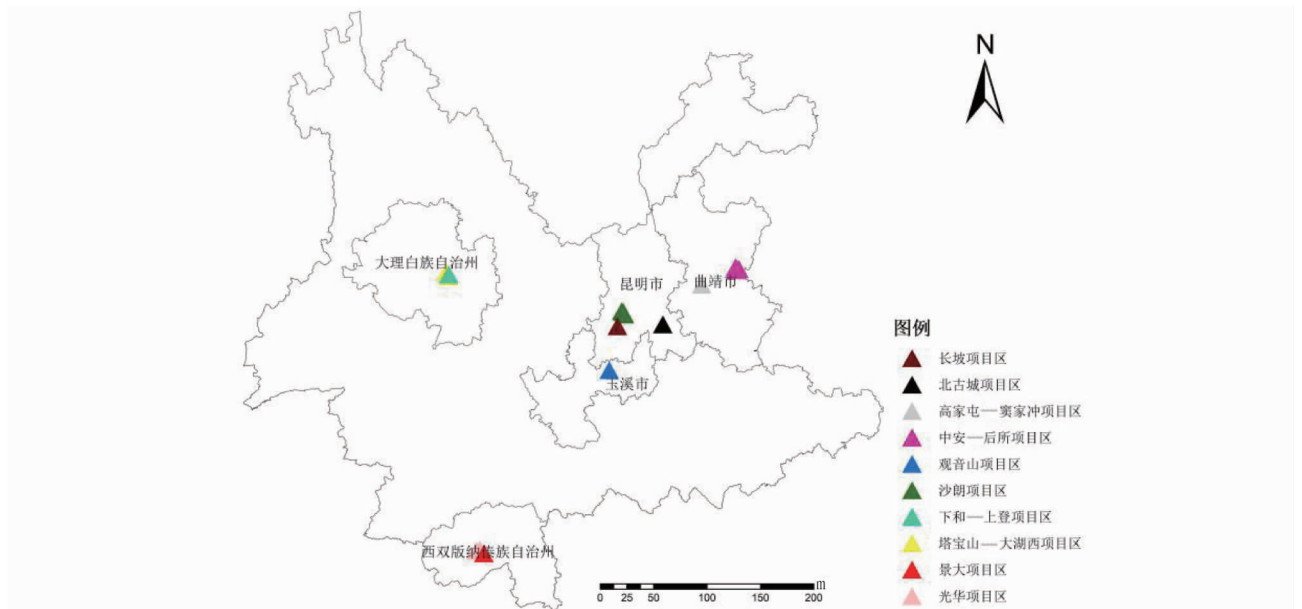


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

**1.2 InVEST 产水量模型** InVEST 模型基于水量平衡原理,通过研究区的降水、地表蒸发、植物蒸腾、土壤深度、根系深度、地形等数据计算每个栅格的产水量。充分考虑不同土地利用类型下土壤渗透的空间差异和地形等因素对径流的影响,定量估算不同土地利用类型的产水量,结果更为科学。同时,对北京山区、黄土高原和横断山区等山区产水或水源涵养评估,也体现了该模型具备参数调整灵活、空间表达性

强等优点。

$$Y_{jx} = \left( 1 - \frac{AET_{sj}}{P_x} \right) \times P_x \quad (1)$$

式中, $Y_{jx}$  为第  $j$  类土地利用/覆被上栅格单元  $x$  的年产水量 (mm);  $P_x$  为栅格单元  $x$  的年平均降水量 (mm);  $AET_{sj}$  为第  $j$  类土地利用/覆被类型上栅格单元  $x$  的实际年平均蒸散量 (mm),通过公式(2)计算。

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

式中,  $R_{xj}$  为土地利用类型  $j$  上栅格单元  $x$  的干燥指数, 无量纲, 表示潜在蒸发量与降水量的比值, 由公式(3)计算;  $k$  为蒸散系数, 由植被叶面积指数 LAI 计算获得, 见公式(4);  $ET_0$  为潜在蒸散量 (mm/d), 计算公式如式(5)。  $\omega_x$  为修正植被年可利用水量与降水量的比值, 无量纲, 由公式(6)计算。

$$R_{xj} = \frac{k \times ET_0}{P_x} \quad (3)$$

$$k = \min\left(1, \frac{LAI}{3}\right) \quad (4)$$

$$ET_0 = 0.0013 \times 0.408 \times RA \times (T_{avg} + 17) \times (TD - 0.0123P)^{0.76} \quad (5)$$

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} \quad (6)$$

式中,  $RA$  为太阳大气顶层辐射 [ $MJ/(m^2 \cdot d)$ ];  $T_{avg}$  是日最高温均值和日最低温均值的平均值 ( $^{\circ}C$ );  $TD$  是日最高温均值和日最低温均值的差值 ( $^{\circ}C$ )。太阳大气顶层辐射用气象站太阳平均总辐射除以 50% 计算获得<sup>[16]</sup>。  $Z$  为 zhang 系数;  $AWC_x$  为植被有效可利用水, 由土壤深度和理化性质决定, 计算公式如下:

$$AWC_x = \min(\max SD_x, RD_x) \times PAWC_x \quad (7)$$

$$PAWC_x = 54.509 - 0.132Sand - 0.003(Sand)^2 - 0.055Silt - 0.006(Silt)^2 - 0.738Clay + 0.007(Clay)^2 - 2.688OM + 0.501(OM)^2 \quad (8)$$

式中,  $\max SD_x$  为最大土壤深度;  $RD_x$  为根系深度;  $PAWC_x$  为植被可利用水含量;  $Sand$  为土壤砂粒含量 (%);  $Silt$  为土壤粉粒含量 (%);  $Clay$  为土壤黏粒含量 (%);  $OM$  为土壤有机质含量 (%)。

**1.3 水源涵养模型** 该研究选取研究区均为山地, 必须考虑地形对水源涵养功能的影响, 因此在产水量的基础上, 再利用地形指数、土壤饱和导水率和流速系数对产水量进行修正, 得到研究区的水源涵养量。

$$WR = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_s}{300}\right) \times Y_{jx} \quad (9)$$

$$TI = \lg\left(\frac{DA}{SD \times PS}\right) \quad (10)$$

$$\ln K_s = 20.62 - 0.96 \times \ln(C) - 0.66 \times \ln(S) - 0.46 \times \ln(OC) - 8.43 \times BD \quad (11)$$

式中,  $WR$  为水源涵养量 (mm);  $TI$  为地形指数, 无量纲;  $K_s$  为土壤饱和导水率 (cm/d), 该研究选用土壤传递函数间接计算得出<sup>[17]</sup>。  $V$  为流速系数, 数据无量纲;  $Y_{jx}$  为产水量。  $DA$  为集水区栅格数量, 无量纲;  $SD$  为土壤深度 (mm);  $PS$  为百分比坡度。  $C$  为土壤黏粒含量 (%);  $S$  为土壤砂粒含量 (%);  $OC$  为土壤有机碳含量 (%);  $BD$  为土壤容重 ( $g/cm^3$ )。

**1.4 水源涵养功能影响因素** 为定量分析影响因素与不同水源涵养功能等级之间的关系, 利用地图代数原理, 利用公式(12)对研究区的土地利用类型、坡度与水源涵养功能之间

的相关变化信息进行提取。

$$C_{ij} = R_{ij} \times 100 + S_{ij} \quad (12)$$

式中,  $C_{ij}$  为各个影响因素图层与水源涵养功能图层进行空间叠加的综合图层,  $R_{ij}$  为各个影响因素图层,  $S_{ij}$  为水源涵养功能图层。通过对 2 个不同的专题图层进行空间叠加运算, 计算结果既能在空间上反映不同专题图层的等级变化, 同时又能得到不同图层之间的相互转换关系。

## 1.5 数据来源及处理

**1.5.1 产水量数据。** 水源涵养功能受到多种因素的影响, 其计算过程必然关系到多种因素的信息提取与集成利用。利用 InVEST 模型进行产水量评估需要的输入数据包括土地利用/覆被图、年平均降水量图、年平均潜在蒸散量图、土壤根系深度图、植物可利用水含量 (PAWC)、集水区以及生物物理参数表。

(1) 年平均降水量。降水数据来源于中国气象数据网 (<https://data.cma.cn/>) 的中国地面降水月值  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  格点数据集, 为对应研究区开发时段, 也为了避免单年数据的低代表性, 该研究选取 2000—2020 年的降水数据, 运用 Python 3.8.3 提取项目区周围格点的月降水量, 在 ArcGIS 中以地形作为协变量进行空间插值获得研究区多年平均降水量栅格图层。

(2) 年平均潜在蒸散量。太阳辐射数据来源于 WorldClim (<https://www.worldclim.org/>), 气温数据来源于中国气象数据网 (<https://data.cma.cn/>) 的中国地面累年值日值数据集 (1981—2010 年) 的累年平均日最高气温和日最低气温。估算潜在蒸散量的方法有很多, 该研究使用 InVEST 模型推荐的 Modified-Hargreaves。在 ArcGIS 中进行克里金插值、重采样和裁剪等处理, 并运用栅格计算器对太阳辐射、平均日最高气温和最低气温计算得到多年平均潜在蒸散量栅格图。

(3) 土地利用类型。土地利用类型由资源三号卫星遥感影像解译得到。根据数据分析要求将土地利用类型划分为 7 个一级地类、14 个二级地类, 分别是耕地 (水田、旱地)、林地 (有林地、灌木林地、其他林地)、园地、草地、水域 (水库坑塘、滩涂)、建设用地 (农村居民点用地、城镇用地、其他建设用地)、未利用地 (裸地、荒草地)。同时, 利用 Google Earth 高分辨率影像 (2020 年), 对土地利用解译结果和植被覆盖情况进行野外选点验证并访谈当地居民和工作人员, 对土地利用数据进行现场复核。

(4) 土壤深度。土壤数据来源于北京大学城市与环境学院地理数据平台 (<http://geodata.pku.edu.cn/>) 的中国土壤数据集。对全国土壤数据进行空间插值后得到云南省土壤根深图, 再运用项目区范围数据对云南省土壤根深图进行裁剪得到研究区的土壤根深栅格数据。

(5) 植被可利用水含量。结合中国土壤数据集中土壤质地的划分, 将砂粒、粉粒、黏粒、有机质等质量分数导入土壤有效含水量的经验公式中, 在 ArcGIS 中利用字段计算器求出 PAWC, 由空间分析和转换工具处理, 得到植被可利用含水量图。

(6) *Z* 系数。*Z* 系数是表征降水季节性特征的一个常数,其值在 1~30,降水主要集中在冬季时,其值越大,降水主要集中在夏季或季节分布较均匀时,其值越小;但在降水量相等的地区,降水事件越频繁,*Z* 值越大。产水量的大小受到 *Z* 系数影响,在热带地区 *Z* 值取 4;在季风气候区 *Z* 值取 1;在温带海洋性气候区 *Z* 值取 9<sup>[18]</sup>;该研究区均属于季风气候,故 *Z* 值取 1。

候,故 *Z* 值取 1。

(7) InVEST 模型参数。蒸散系数和流速系数数据是参考相关文献与结合 InVEST 用户指南推荐使用的参考数据以及根据研究区地表植被覆盖实际情况确定。LULC\_veg 表示采用何种实际蒸散量公式的信息,含有植被土地利用/覆被赋值为 1,其他赋值为 0(表 2)。

表 2 InVEST 模型参数

Table 2 InVEST model parameter

一级地类 First class land	二级地类 Second class land	蒸散系数 <i>K<sub>e</sub></i>	根系深度 Root depth	流速系数 Flow rate coefficient	LULC_veg
耕地 Arable land	水田	0.8	700	2 012	1
	旱地	0.2	100	900	1
园地 Garden plot	园地	0.8	700	500	1
林地 Forest land	有林地	0.8	7 000	200	1
	灌木林地	0.4	5 000	249	1
	其他林地	1.0	2 500	300	1
草地 Grassland	草地	0.7	250	500	1
水域 Water area	水库坑塘	1.0	1 000	2 012	0
	滩涂	0.7	1 000	2 012	0
建设用地 Construction land	农村居民点用地	0.4	500	2 012	0
	城镇用地	0.3	500	2 012	0
	其他建设用地	0.3	500	2 012	0
未利用地 Unused land	裸地	0.5	10	1 500	0
	荒草地	0.6	500	400	1

1.5.2 水源涵养数据来源及处理。

(1) 地形指数。通过项目区资料获得 2012 年等高线、高程点、项目区范围,通过 ArcGIS 10.2 创建 TIN 后转为栅格,得到开发前的 DEM;运用 2020 年资源三号卫星影像立体像对,采用 ENVI 5.3 提取 DEM。通过 ArcGIS 10.2 的水文分析工具进行填洼、流向、流量等计算步骤,获得流量栅格,根据项目区情况确定阈值,利用 Con 条件函数筛选主要径流,经过盆地分析得到流域图。再采用面转栅格工具得到流域单元集水区栅格的数量;通过 ArcGIS 中 3D 分析提取 DEM 中的百分比坡度,此时会得到坡度为 0 的栅格,为了不影后面的计算,将百分比坡度为 0 的点替换成 0.000 01,由于该值远小于地形指数的计算位数,误差可忽略不计。最后综合百分比坡度、流域单元集水区栅格数量以及土壤深度可得到流域的地形指数。

(2) 土壤饱和导水率。基于土壤黏粒、砂粒、有机碳、土壤容重含量,运用土壤传递函数间接测算出土壤饱和导水率。

(3) 流速系数。根据 USDA-NRCS 提供的国家工程手册上的流速-坡度-景观表格,乘以 1 000 获得。

2 结果与分析

2.1 产水量时空变化 总体来看(图 2),开发后项目区平均产水量和平均产水深度均低于开发前,城市建设区的产水总量高于工业区,城市建设区的产水量下降程度高于工业区。从平均产水量来看,工业区的平均产水量从高到低依次为中安—后所项目区、北古城项目区、观音山项目区、高家屯—窰家冲项目区、长坡项目区。城市建设区的平均产水量

从高到低依次为光华项目区、景大项目区、沙朗项目区、塔宝山—大湖西项目区、下和—上登项目区,表明平均产水量主要受土地利用类型影响。从产水深度的变化来看,工业区减少量从高到低依次为观音山项目区、北古城项目区、高家屯—窰家冲项目区、长坡项目区、中安—后所项目区。城市建设区减少量从高到低依次为塔宝山—大湖西项目区、沙朗项目区、下和—上登项目区、光华项目区、景大项目区。从空间上看(图 3~4),产水深度变化受土地利用类型影响较大,耕地、园地、林地、草地、未利用地转变为建设用地后产水量下降,水域、荒草地转变为其他地类后产水深度增加。产水量大小与项目区面积具有较强的相关性,产水量变化与降水量变化具有一致性。

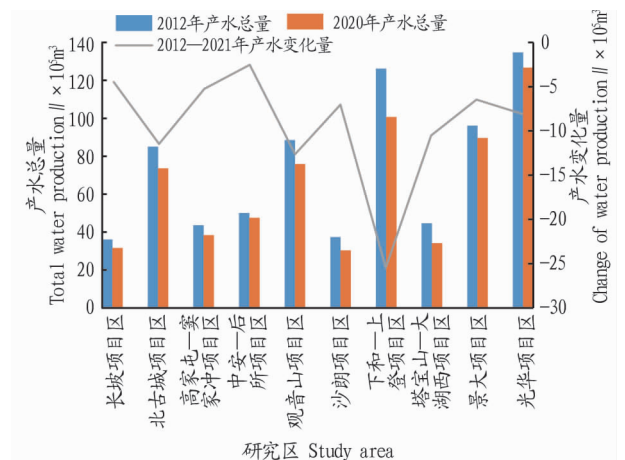


图 2 2012 和 2020 年研究区产水总量及其变化

Fig. 2 The total water production in the study area and its changes in 2012 and 2020

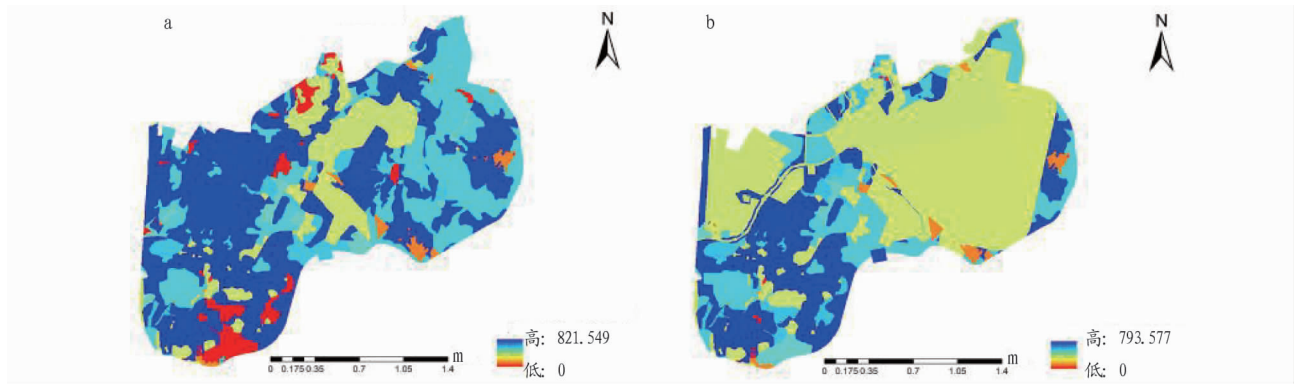


图3 2012年(a)和2020年(b)北古城项目区单元产水深度(单位:mm)

Fig.3 Water production depth of units in Beigucheng project area in 2012 (a) and 2020 (b)

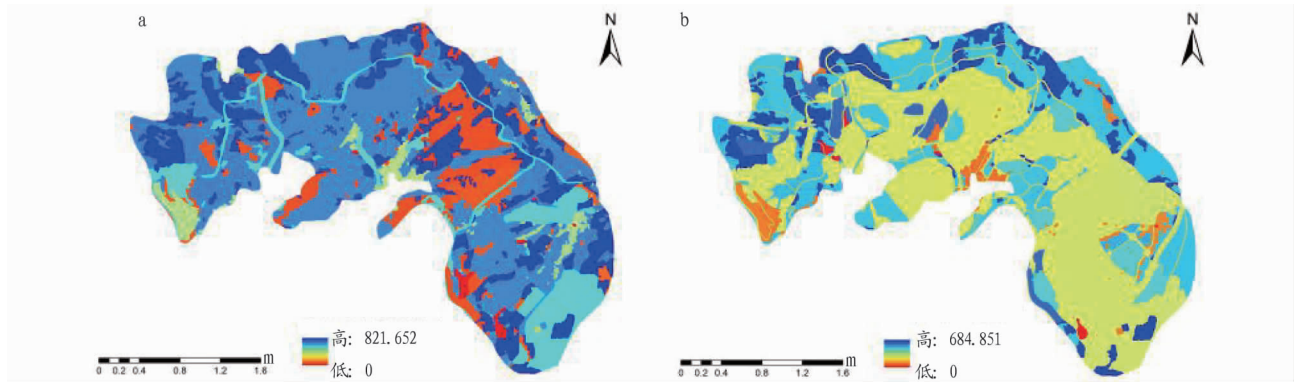


图4 2012年(a)和2020年(b)下和—上登项目区单元产水深度(单位:mm)

Fig.4 Water production depth of units in the Xiahe-Shangdeng project area in 2012 (a) and 2020 (b)

**2.2 水源涵养功能时空变化** 总体来看,大部分项目区水源涵养总量均低于开发前,仅光华项目区水源涵养总量高于开发前,城市建设区的水源涵养总量高于工业区,工业区水源涵养量下降程度高于城市建设区。从水源涵养量变化来看,在工业区中,减少量从高到低依次是北古城项目区、观音山项目区、高家屯—窦家冲项目区、中安—后所项目区、长坡项目区。在城市建设区中,变化量从高到低依次是下和—上登项目区、景大项目区、沙朗项目区、塔宝山—大湖西项目区、光华项目区。从平均水源涵养能力变化(图5)来看,工业区减少量从高到低依次是高家屯—窦家冲项目区、中安—后所项目区、北古城项目区、观音山项目区、长坡项目区。城市建设区减少量从高到低依次是下和—上登项目区、沙朗项目区、塔宝山—大湖西项目区、景大项目区、光华项目区。空间趋势表明(图6~7),水源涵养能力变化与土地利用类型变化具有一致性。

### 2.3 影响因素分析

**2.3.1 土地利用类型。**从土地利用结构来看(表3、图8~9),开发后各项目区的耕地减少,大部分项目区园地减少,建设用地面积均有不同程度的扩大,增长量由大到小依次为下和—上登项目区、北古城项目区、高家屯—窦家冲项目区、观音山项目区、塔宝山—大湖西项目区、中安—后所项目区、光华项目区、沙朗项目区、景大项目区、长坡项目区。

不同土地利用类型的水源涵养能力存在差异。从时间

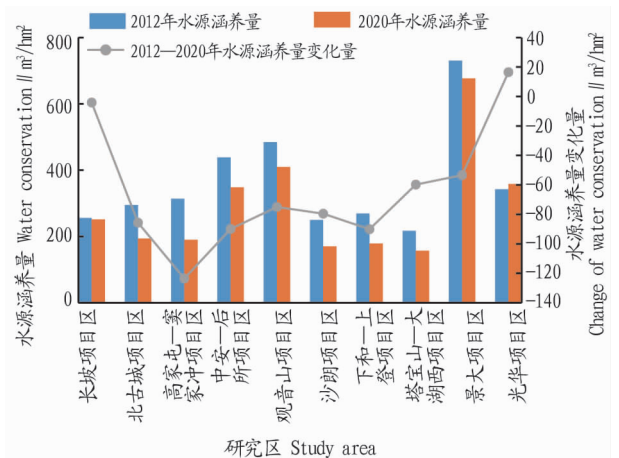


图5 2012和2020年研究区平均水源涵养量及其变化

Fig.5 Average water conservation in the study area and its changes in 2012 and 2020

上看,无论开发前还是开发后,林地的水源涵养能力最高,耕地、园地、草地的水源涵养能力在不同的项目区有差异。2012—2020年项目区耕地的水源涵养能力均呈下降趋势,70%研究区园地和林地的水源涵养能力呈下降趋势,50%研究区草地的水源涵养能力呈下降趋势。

**2.3.2 植被类型。**在未受人为因素影响的区域,存在植被的自然演替。从表3可以看到,长坡项目区、北古城项目区、中安—后所项目区、塔宝山—大湖西项目区、光华项目区的

林地面积均有不同程度的增加。从土地利用类型(图 10~11)可以看出,长坡项目区的部分旱地转为其他林地;北古城项目区中部分裸地转变为草地和其他林地,部分草地转变为

有林地;中安一后所项目区中区块二中部的裸地转变成草地或其他林地,灌木林地转变为有林地或其他林地;塔宝山一大湖西项目区中大湖西区块的草地转变成其他林地。

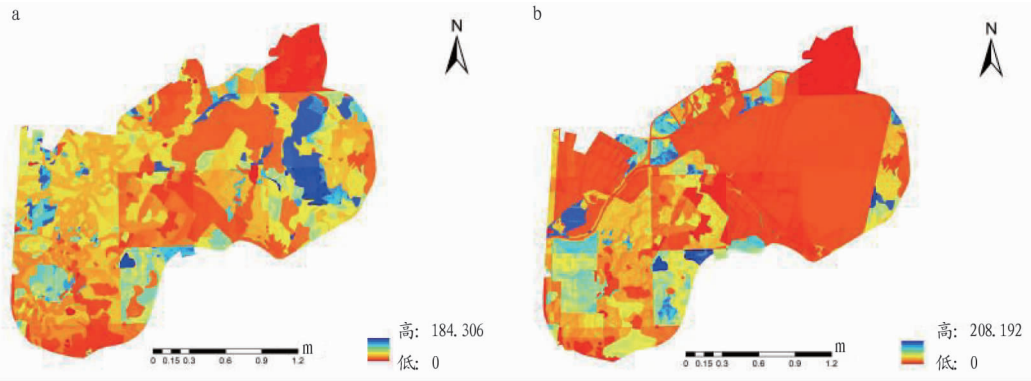


图 6 2012 年(a)和 2020 年(b)北古城项目区水源涵养能力(单位:mm)

Fig. 6 Water conservation capacity of Beigucheng project area in 2012 (a) and 2020 (b)

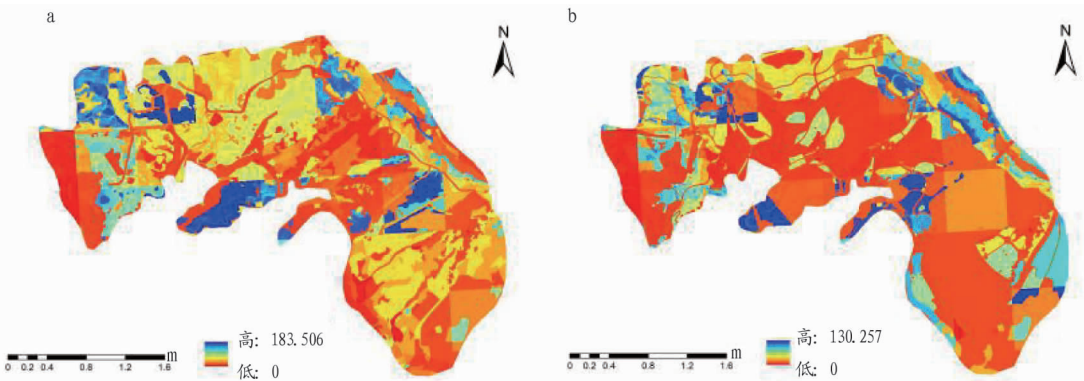


图 7 2012 年(a)和 2020 年(b)上和一下登项目区水源涵养能力(单位:mm)

Fig. 7 Water conservation capacity of the Shanghe-Xiaden project area in 2012 (a) and 2020 (b)

表 3 2020 年较 2012 年土地利用类型面积变化

Table 3 Changes of the area of land use types in 2020 compared to 2012

序号 No.	项目区名称 Project area name	耕地 Cultivated land	园地 Garden land	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Waters	建设用地 Construction land	未利用地 Unutilized land
1	长坡项目区	-57.62	-2.85	11.14	17.89	-0.43	31.86	0.00
2	北古城项目区	-389.16	-45.37	14.16	10.40	-3.74	462.43	-48.72
3	高家屯—窰家冲项目区	-118.57	-79.57	-27.16	-1.52	-2.90	235.46	-5.74
4	中安一后所项目区	-22.23	4.44	2.29	-68.10	0.00	138.52	-54.93
5	观音山项目区	-51.80	-25.32	-93.86	34.13	-6.52	189.47	-46.10
6	沙朗项目区	-22.23	-6.31	-7.48	-14.69	0.43	51.56	-1.26
7	下和—上登项目区	-319.48	-205.72	-30.88	13.74	-10.43	843.80	-291.02
8	塔宝山一大湖西项目区	-97.18	-34.69	13.93	-65.05	-0.96	183.18	0.77
9	景大项目区	-0.67	-48.10	0.00	0.00	-0.87	49.62	0.00
10	光华项目区	-2.20	-61.64	0.04	-0.03	-1.73	65.55	0.00

2.3.3 地形。时间趋势表明(图 12~14),2012—2020 年各项目区的平均高程均呈现下降趋势。在工业区中,减少量从高到低依次是中安一后所项目区、长坡项目区、北古城项目区、高家屯—窰家冲项目区、观音山工业区。城市建设区减少量从高到低依次是塔宝山一大湖西项目区、下和—上登项目区、沙朗项目区、景大项目区、光华项目区。城市建设区高程变化与水源涵养总量变化排序基本一致。

地调研得知该项目区入驻产业为煤矿、金属加工等重工业,需要大范围平整土地,因此采用“削峰填谷”的开发方式,对地形的改造程度较高。在城市建设区中,塔宝山一大湖西项目区的高程变化最大,经实地调研得知入驻产业为仓储物流、汽配厂等,同样需要大范围平整土地,且塔宝山一大湖西项目区建设用地面积增加了 183.18 hm<sup>2</sup>,为满足土地利用布局的需要,对地形地貌的改造程度较大。

在工业区中,中安一后所项目区的高程变化最大,经实

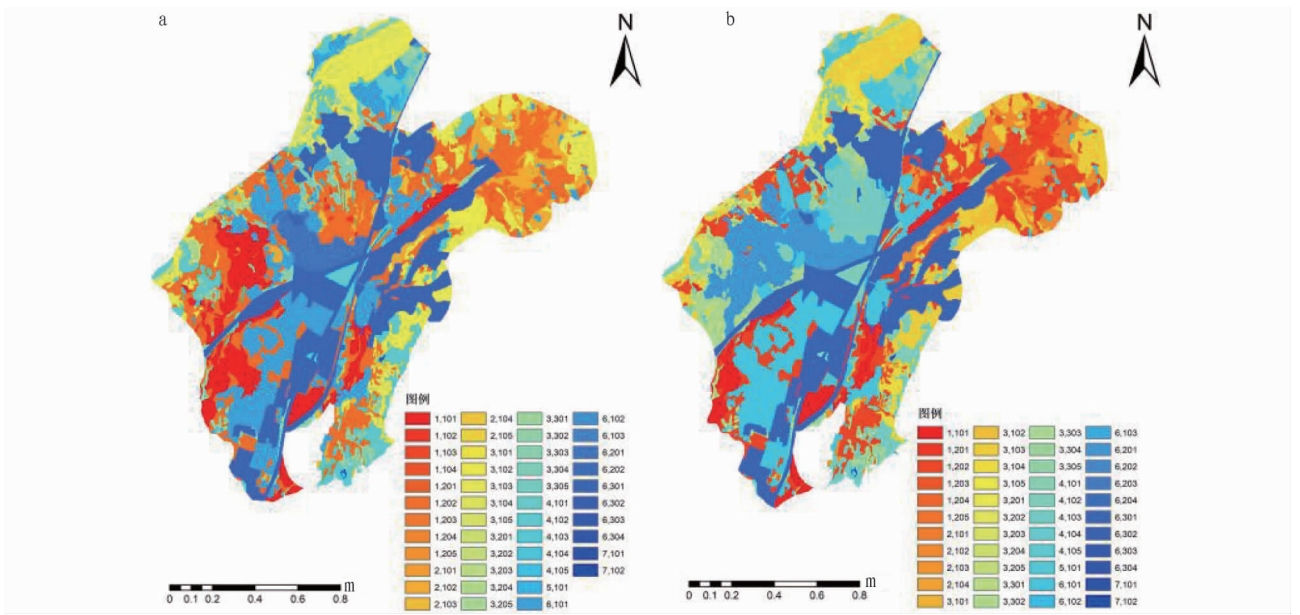


图 8 2012 年 (a) 和 2020 年 (b) 长坡项目区土地利用类型与水源涵养功能叠加图

Fig. 8 Superposition diagram of land use type and water conservation function in Changpo Project area in 2012 (a) and 2020 (b)

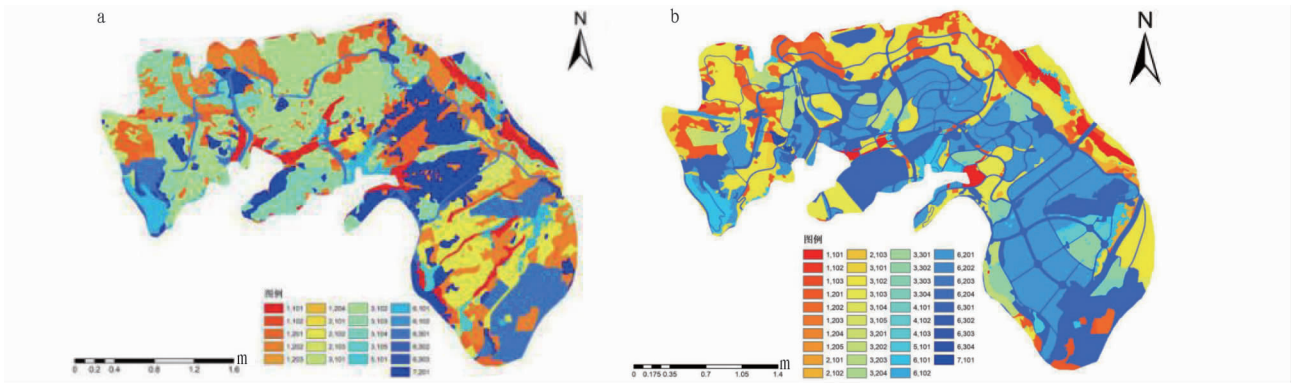


图 9 2012 年 (a) 和 2020 年 (b) 下和一上登项目区土地利用类型与水源涵养功能叠加图

Fig. 9 Superposition map of land use type and water conservation function in Xiahe-Shangdeng project area in 2012 (a) and 2020 (b)

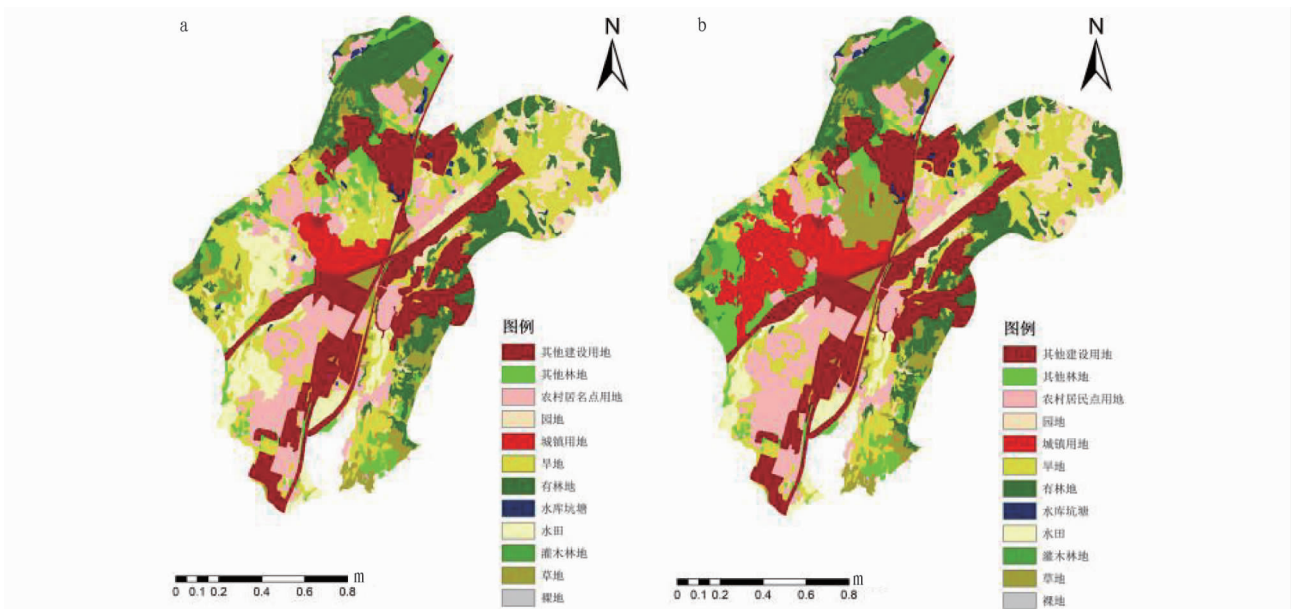


图 10 2012 年 (a) 和 2020 年 (b) 长坡项目区土地利用类型

Fig. 10 Land use types in the Changpo project area in 2012 (a) and 2020 (b)

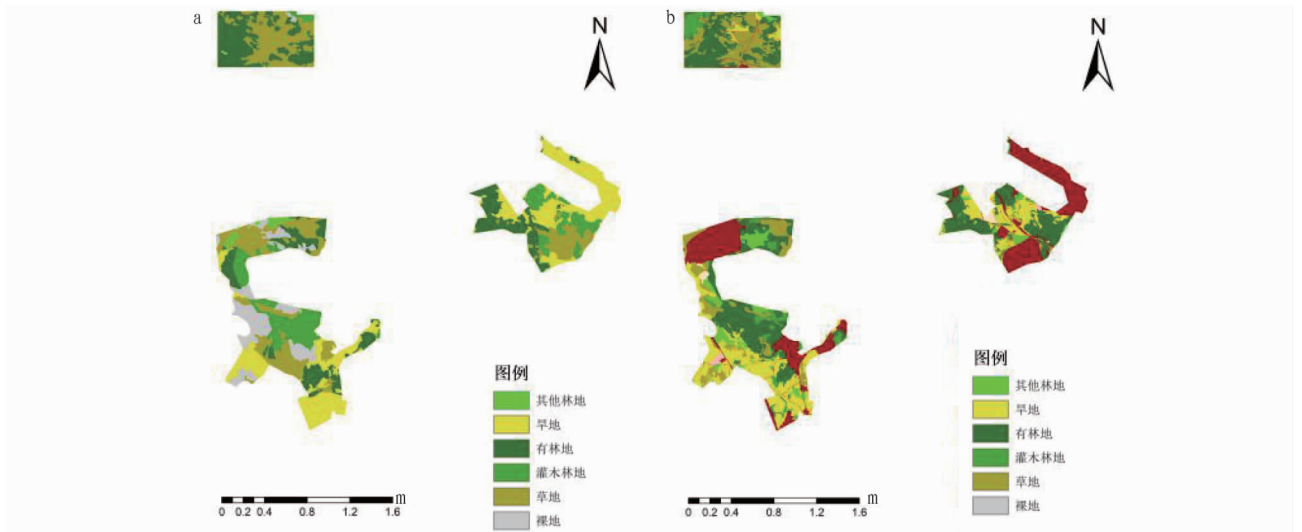


图 11 2012 年 (a) 和 2020 年 (b) 中安—后所项目区土地利用类型

Fig. 11 Land use types in the Zhong'an-Housuo project area in 2012 (a) and 2020 (b)

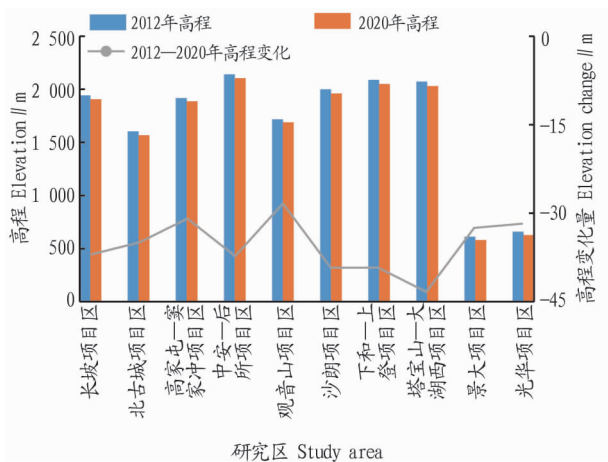


图 12 2012 和 2020 年研究区平均高程及其变化

Fig. 12 Average elevation and its change in the study area in 2012 and 2020

2.3.4 降水量。从空间上看,位于滇中的长坡、北古城、观音山、沙朗项目区降水量较为接近,2020 年平均降水量 810.80~904.17 mm;位于滇西北下和—上登、塔宝山—大湖西项目区,2020 年平均降水量 792.48~824.13 mm;滇东北包括高家屯—窠家冲、中安—后所项目区,2020 年平均降水量 900.77~1 043.31 mm;滇南景大、光华项目区,2020 年平均降水量 1 307.84~1 447.18 mm。这体现了云南省降水空间分布不均。

降水量是影响水源涵养功能的重要气候因子,时间趋势表明(图 15),2012—2020 年各项目区的降水量均呈减少状态。下降量从大到小依次是下和—上登项目区、沙朗项目区、塔宝山—大湖西项目区、观音山项目区、光华项目区、景大项目区、长坡项目区、中安—后所项目区、高家屯—窠家冲项目区、北古城项目区。降水量与产水量的变化趋势有一致性。

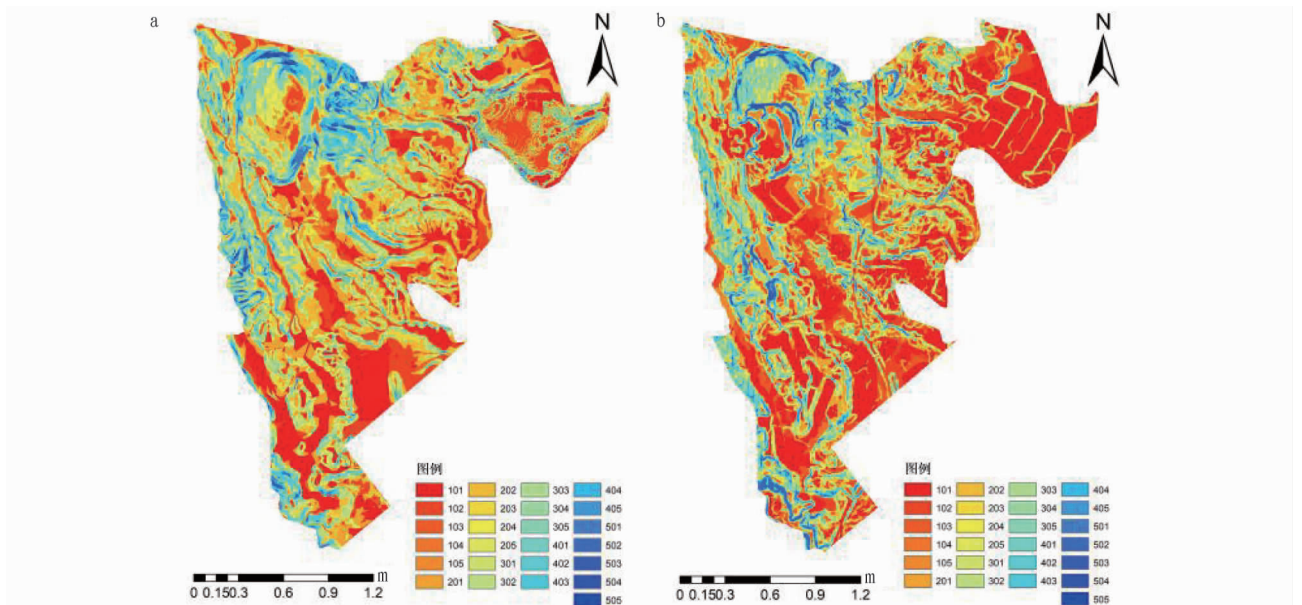


图 13 2012 年 (a) 和 2020 年 (b) 观音山项目区坡度与水源涵养功能空间叠加图

Fig. 13 The overlay chart of the slope and water conservation function space of the Guanyinshan project area in 2012 (a) and 2020 (b)



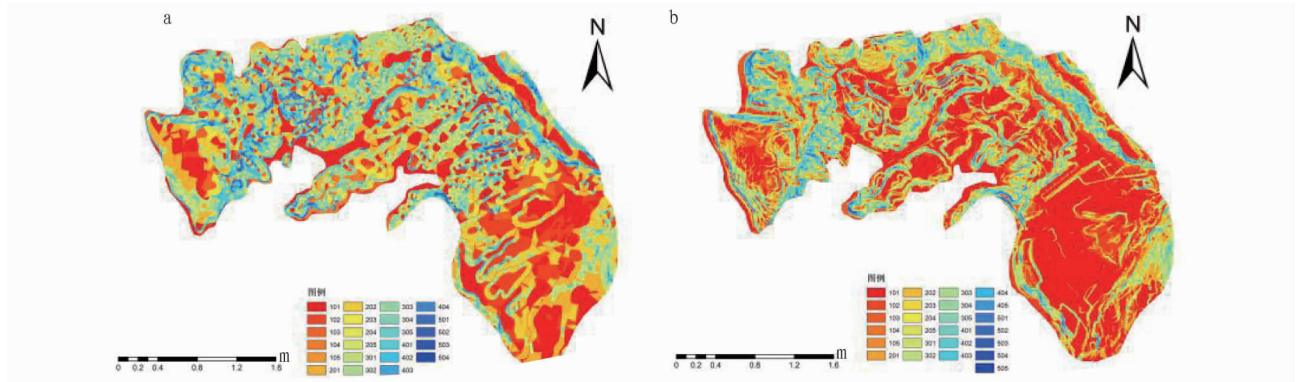


图 14 2012 年 (a) 和 2020 年 (b) 下和—上登项目区坡度与水源地涵养功能空间叠加图

Fig. 14 The overlay chart of slope and water conservation function space of Xiahe—Shangdeng project area in 2012 (a) and 2020 (b)

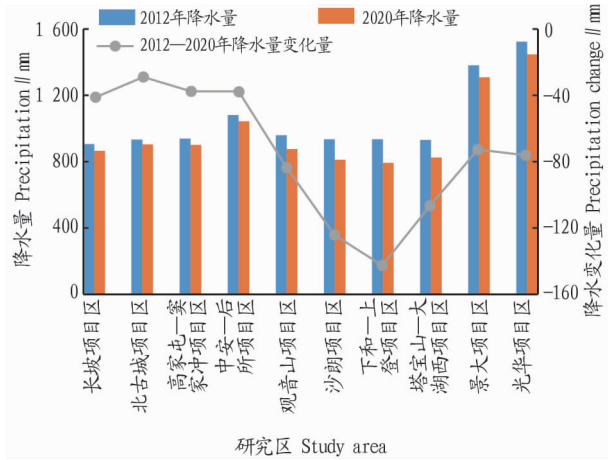


图 15 2012 和 2020 年研究区平均降水量及其变化

Fig. 15 Average precipitation in the study area and its changes in 2012 and 2020

### 3 结论与讨论

**3.1 结论** 基于 InVEST 模型对云南省 2012 和 2020 年 10 个典型项目区水源涵养进行测算, 得到以下结论: 建设开发后项目区平均产水量均低于开发前; 除光华项目区外, 建设开发后项目区水源涵养总量均低于开发前。开发后平均水源涵养量从低到高依次是塔宝山—大湖西项目区、沙朗项目区、下和—上登项目区、高家屯—窦家冲工业园、北古城项目区、长坡项目区、中安—后所项目区、光华项目区、观音山项目区、景大项目区。

该研究发现, 造成低丘缓坡项目区建设开发前后水源涵养量变化的原因主要是土地利用结构、植被、地形、径流、降水、土壤等自然和人为因素。由于土壤 9 年内变化较小, 且受到数据的制约, 采用的是一期的数据, 故将其剔除。土地利用结构变化显示, 不同地类的水源涵养能力有差异, 其中林地的水源涵养能力最高, 耕地、园地、草地的水源涵养能力在不同项目区有差异。植被类型表明, 在未受人为因素影响的区域, 存在植被的自然演替。裸地转变为草地, 草地转变为其他林地, 灌木林地转变为有林地等, 其水源涵养能力也得到一定程度的提升。地形、植被、降水等因素共同影响地表径流的流速和流量, 从而影响水源涵养功能。

**3.2 讨论** 结合实地调研案例, 从积极和消极方面分析低

丘缓坡建设开发对生态环境产生的影响。①低丘缓坡开发改变原来的土地利用结构, 扰动和破坏原有的地表环境, 导致生物多样性的减少。②基础设施建设过程中需要大量的挖方填方工作, 破坏原地表植被, 扰动土体, 使土壤松动、裸露和堆填, 若未及时采取水土保持措施, 容易导致地质灾害的发生。③人类活动必然会产生污染物排放, 如未能恰当处理, 会对周边区域的水源、耕地等生态敏感区产生不良影响, 造成生态破坏、环境污染等问题<sup>[19]</sup>。

根据低丘缓坡建设开发可能造成的生态破坏, 基于水源涵养功能提出相应的对策建议。目前低丘缓坡建设开发模式主要有以下 3 种: 削峰填谷式、分台式、分台式与缓坡式相结合。该研究依据保护生态优先、因地制宜的原则, 提出以下优化措施: 首先, 科学选址和土地规划, 根据山地立体特征, 依据山体不同位置和坡度, 布局不同的土地利用类型, 宜建则建, 宜林则林, 减少对原地表的干扰和破坏; 其次, 调整土地利用结构, 保留具有较强生态源的生态用地, 加强绿化工程设施建设, 提升土地生态功能; 第三, 落实水源涵养规划, 完善水源涵养生态补偿机制, 推进低丘缓坡开发利用可持续发展<sup>[20-21]</sup>。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 陈姗姗, 刘康, 包玉斌, 等. 商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素[J]. 地理科学, 2016, 36(10): 1546-1554.
- [3] 郭丽洁, 尹小君, 苟贞珍, 等. 基于 InVEST 模型的阿克苏河流域产水量评估及环境因素影响研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2020, 38(2): 216-224.
- [4] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 等. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J]. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5.
- [5] 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.
- [6] 宁亚洲, 张福平, 冯起, 等. 秦岭水源涵养功能时空变化及其影响因素[J]. 生态学报, 2020, 39(9): 3080-3091.
- [7] 窦苗, 孙建国, 陈海鹏. 基于 InVEST 模型的横断山区产水量模拟[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(21): 54-58.
- [8] 苑跃, 张亮, 崔林林. 若尔盖高原生态系统水源涵养功能时空变化特征[J]. 生态学报, 2020, 39(8): 2713-2723.
- [9] REDHEAD J W, STRATFORD C, SHARPS K, et al Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale[J]. Science of the total environment, 2016, 569/570: 1418-1426.
- [10] JULIAN J P, GARDNER R H. Land cover effects on runoff patterns in eastern Piedmont (USA) watersheds[J]. Hydrological processes, 2014, 28(3): 1525-1538.

庄相对聚集,所以表现为集聚-随机分布。空间指数  $1.0 < R < 2.0$  的地区主要有东坑镇、杨桥畔镇和海则滩镇,呈现为随机离散分布,该区域地势相对平坦,新开垦耕地数量繁多,空间分布较为离散。③空间指数  $2.0 < R$  的地区主要有红墩界镇、黄蒿界镇,由于其处于北部风沙滩区,后备资源较为丰富,可开垦为耕地自然社会条件较好,呈现均匀分布状态。新开垦耕地空间分布模式呈现出的自北向南聚集-随机-分散-均匀分布递进梯度特征明显。

**2.3 新开垦耕地分布特征影响因素分析** 新开垦耕地分布受到政策、自然和社会三重因子综合影响。政策因素在新开垦耕地空间分布中起到决定性主导作用,退耕还林政策的实施使自留地非法开垦、非法占有林地等问题得到了严肃查处,林业主管部门的执法监督严厉打击了相关违法行为,切实保护了林地等生态红线,林业等相关政策对靖边县新开垦耕地的空间分布起到了决定性主导作用。由于受到地形坡度、可利用水利资源、土壤类型等自然条件限制,自然因素对靖边县新开垦耕地空间分布起到了基础性决定作用。农村社会经济发展对新开垦耕地空间分布起到重要作用,农民对生态环境改善的认知及农业机械化水平的提高也加速了农户开垦耕地的趋势。

### 3 结论与建议

#### 3.1 结论

(1)靖边县新开垦耕地空间分布特征及模式区域差异显著,主要体现在靖边县北部-南部差异。整体上靖边县北部新增耕地密度大于南部地区,密度最大的镇主要有红墩界镇、黄蒿界镇、海则滩镇、东坑镇。由于北部地区为风沙滩区,地势较为平坦,新开垦耕地高密度分布,空间上呈现随机、均匀分布。

(2)不同地域类型新开垦耕地空间分布模式特征各异。北部地区的新开垦耕地空间分布密集,呈现高密度分布形态,空间分布模式以随机、均匀为主,新开垦耕地之间邻近距离较近。南部山区新开垦耕地空间分布密度极低,邻近距离偏大,空间分布相对聚集。南部北部交汇过渡地带新开垦耕地空间分布密度较大,空间分布模式偏向随机分布。

(3)新开垦耕地分布受到政策、自然和社会三重因子影响,政策影响因素发挥决定性作用。区域地形、土壤条件、水

资源条件对新开垦耕地起到限制性作用。社会因素作用不断加强,经济发展、交通条件、农业机械化现代化发展对新开垦耕地的空间分布模式也产生较大影响。

#### 3.2 建议

(1)对可开垦耕地资源进行合理规划及空间管制。耕地资源的规划应首要考虑地域自然条件,再充分与村庄分布相结合,依照中心村-自然村由大到小的空间体系分布。自然条件中,在北部地势相对平坦、自然基质基本相同地区,新开垦耕地应按照中心地理论优先集中于中心村,其次可分布于自然村,使耕地在空间上均匀分布。南部山区由于地形限制,在未来新开垦耕地规划时,应最大程度围绕中心村,也可沿山脚或河流走廊式分布。

(2)要加强土地整治工程及高标准农田建设工作。利用土地整治工程及高标准农田建设中的工程措施,通过对农田、灌溉系统、道路及林网的建设,促使农业生产更加便利、农村生活更加美好和农村生态环境不断改善。工程措施中重要基础农业设施和公共农业服务应以村庄为中心对耕地全面覆盖到达最大服务半径,使新开垦耕地尽量聚集分布。

#### 参考文献

- [1] 田光进,周全斌,赵晓丽,等.中国新开垦耕地资源空间分布特征及生态背景研究[J].资源科学,2002,24(6):1-6.
- [2] 石辉,刘秀花,陈占飞,等.陕北榆林毛乌素沙地大规模土地整治开发的生态环境问题及其对策[J].生态学杂志,2019,38(7):2228-2235.
- [3] 夏利恒,刘京,尉芳,等.陕西渭北旱塬区耕地时空格局变化分析[J].农业工程学报,2021,37(5):256-264.
- [4] 李昊,李世平,银敏华.中国土地生态安全研究进展与展望[J].干旱区资源与环境,2016,30(9):50-56.
- [5] 郑谢彬.战略性新兴产业创新空间格局及影响因素研究:以湖南省为例[J].湖南工业职业技术学院学报,2021,21(1):118-124.
- [6] 褚永彬.地理空间认知驱动下的空间分析与推理[D].成都:成都理工大学,2008.
- [7] 王雪芹,戚伟,刘盛和.中国小城镇空间分布特征及其相关因素[J].地理研究,2020,39(2):319-336.
- [8] 董思,任志远,魏倩倩.生态脆弱区土地综合承载力时空差异分析:以榆林市为例[J].水土保持研究,2017,24(6):286-291,299.
- [9] [西部开发]西部大开发 靖边大发展 - 见证陕西[EB/OL]. [2021-02-05]. <http://www.jzss.org/>.
- [10] 巩雪娇.靖边地区全新世以来的环境演变研究[D].石家庄:河北地质大学,2020.
- [11] 刘文浩,仲金虎,范天来,等.陕北石油产区生态可持续发展研究:以靖边县为例[J].国土与自然资源研究,2013(5):58-61.
- [12] 杨忍,刘彦随,龙花楼,等.中国村庄空间分布特征及空间优化重组解析[J].地理科学,2016,36(2):170-179.
- [13] SCORDO F, LAVENDER T M, SEITZ C, et al. Modeling water yield: Assessing the role of site and region-specific attributes in determining model performance of the InVEST seasonal water yield model[J]. Water, 2018, 10:1-42.
- [14] 陈武强,罗鲜美,季金娥,等.昆明西华湿地公园生态系统服务价值评价研究[J].价值工程,2019,38(10):167-170.
- [15] 赵元藩,宋东华,温庆忠,等.玉溪市森林生态系统服务功能价值评估[J].林业调查规划,2011,36(1):12-18,25.
- [16] 杨芳,支玲,郭小年,等.云南省玉龙县天保工程森林生态系统服务功能价值评估[J].西南林业大学学报(社会科学),2017,1(1):69-76.
- [17] 社军凯.考虑垂直地带性的山区分布式水文模拟与应用[D].北京:中国水利水电科学研究院,2019.
- [18] 吴丹,邵全琴,刘纪远,等.中国草地生态系统水源涵养服务时空变化[J].水土保持研究,2016,23(5):256-260.
- [19] 陈丽,郝晋珉,陈爱琪,等.基于二元水循环的淮黄海平原耕地水源涵养功能研究[J].生态学报,2017,37(17):5871-5881.
- [20] ZHANG C Q, LI W H, ZHANG B, et al. Water yield of Xitiaoxi River basin based on InVEST modeling[J]. Journal of resources and ecology, 2012, 3(1):50-54.
- [21] 宋梦意,王盛毅,卫乐乐.浙江省低丘缓坡土地资源开发利用研究:以工业建设用地为视角[J].河南教育学院学报(自然科学版),2012,21(3):52-54.
- [22] 王驷.生态视角下城镇上山实施回顾与规划对策[D].重庆:重庆大学,2014.
- [23] 张健.以提升生态功能为导向的城市绿道系统规划方法研究:以成都天府绿道为例[J].西部人居环境学刊,2019,34(6):73-78.

(上接第78页)