

北京市北部山区生态清洁小流域综合效益及其影响因素

周子赫¹, 颜婷燕², 王姣³, 程金花¹, 王云琦¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.北京市水生态与水土保持中心, 北京 101117; 3.北京水木芳泽生态科技有限公司, 北京 100036)

摘要: [目的] 定量分析小流域的功能结构, 探究小流域发展的影响因素, 全面了解北京市北部山区生态清洁小流域建设的成效, 为山区小流域的综合治理和发展提供理论依据。[方法] 选取延庆区的碓臼石小流域、怀柔区的鱼水洞小流域、密云区的古北口小流域以及昌平区的葫芦河小流域作为具有代表性的示范区域, 结合研究区域的主要特征和治理目标, 构建北京市北部山区小流域的综合效益评价指标体系, 通过层次分析法和加权综合指数法对小流域进行综合效益评价, 并运用系统障碍度模型揭示生态清洁小流域建设的主要影响因素。[结果] ①各小流域综合治理取得一定成效。葫芦河小流域由初级标准提升至中级标准, 碓臼石小流域、鱼水洞小流域和古北口小流域综合建设均已达到初级标准。②文中引入障碍度模型, 对不同影响因子的贡献度进行量化, 提高了评价的精准性。③在北京市北部山区小流域在未来的发展过程中, 生态效益应关注土壤侵蚀模数, 经济效益应关注经济投产比和土地生产率, 社会效益应关注恩格尔系数和乡村从业人员比例, 水质提升效益应关注 COD 含量。[结论] ①本研究提出的小流域综合效益评价体系在北京市北部山区是实用可行的。②通过开展生态清洁小流域治理工作, 北京市北部山区水环境和水土流失情况得到了有效控制, 小流域内产业结构逐步完善, 生态和人居环境得到提高, 促进了小流域水土资源、生态环境和经济社会的协调发展。

关键词: 北京市北部山区; 生态清洁小流域; 障碍度模型; 综合评价指标体系; 系统评价; 影响因素分析
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2025)02-0114-10 **中图分类号:** S157.1

文献参数: 周子赫, 颜婷燕, 王姣, 等.北京市北部山区生态清洁小流域综合效益及其影响因素[J].水土保持通报, 2025, 45(2):114-123. Zhou Zihe, Yan Tingyan, Wang Jiao, et al. Comprehensive benefit and influencing factors of ecologically clean watersheds at mountainous areas in Northern Beijing City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 114-123. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.013; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.02.013.

Comprehensive benefit and influencing factors of ecologically clean watersheds at mountainous areas in Northern Beijing City

Zhou Zihe¹, Yan Tingyan², Wang Jiao³, Cheng Jinhua¹, Wang Yunqi¹

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Beijing Center for Water Ecology and Soil and Water Conservation, Beijing 101117, China; 3.Beijing Shuimu Fangze Ecological Technology Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: [Objective] The functional structure of the watersheds was quantitatively analyzed, and the influencing factors on the development of the watersheds were explored, in order to comprehensively understand the efficacy of constructing ecologically clean watersheds in the mountainous areas of Northern Beijing City, and provide a theoretical basis for the comprehensive management and development of the watersheds in the mountainous areas. [Methods] The small watersheds in Diaoliushi, Yushuidong, Gubeikou, and Huluhu River in the Yanqing, Huairou, Miyun, and Changping Districts, respectively, were

收稿日期:2024-09-09

修回日期:2024-12-18

采用日期:2024-12-18

资助项目:北京市自然科学基金资助项目“基于多元技术的密云水库流域河流氮通量调控机制”(8232040)

第一作者:周子赫(1997—),女(汉族),吉林省通化市人,硕士研究生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email:zihe_zhou2024@126.com。

通信作者:程金花(1979—),女(汉族),山东省聊城市人,博士,教授,主要从事土壤侵蚀、森林水文研究。Email:Jinhua_cheng@126.com。

selected as representative areas, and the main characteristics and governance objectives of each area was combined to construct a comprehensive benefit evaluation index system for these small watersheds in the mountainous areas of Northern Beijing City. The comprehensive benefit evaluation of the small watersheds was conducted via an analytic hierarchy process and weighted comprehensive index method, and the main influencing factors of constructing ecologically clean watersheds were revealed by the systematic obstacle degree model. [Results] ① Different results were found for the comprehensive management of each small watershed. The Hulu River watershed was upgraded from the primary to intermediate standard, and the comprehensive construction of the Zhujiushi, Yushuidong, and Gubeikou watersheds reached the primary standard. ② The obstacle degree model, which was introduced to quantify the contribution of different influencing factors, provided accurate evaluations. ③ In the future development process of small watersheds in the mountainous areas in Northern Beijing City, attention should be paid to the soil erosion modulus, economic production ratio and land productivity, Engel coefficient (household food expenditure ratio) and the proportion of rural employees, and the chemical oxygen demand (COD) content for the ecological, economic, social, and water-quality improvement benefits, respectively. [Conclusion] ① The comprehensive benefit evaluation system of small watersheds proposed in this study is practical and feasible in the mountainous areas in Northern Beijing City. ② Through the management of ecologically clean watersheds, the water environment and soil erosion were effectively controlled, the industrial structure in the watersheds was gradually enhanced, the ecological and human settlements were improved, and the coordinated development of soil and water resources, ecological environment, and economy and society were promoted.

Keywords: mountainous areas in Northern Beijing City; ecologically clean watershed; obstacle degree model; comprehensive evaluation index system; system evaluation; analysis of influencing factors

中国水土流失较为严重^[1]。小流域是水源汇集的最小自然单元,也是实施区域水源保护与土壤侵蚀防控工作的基础组成部分^[2]。同时,小流域作为多元化的自然、社会、经济复合系统,其可持续发展对区域生态经济活动和人口生存发展具有重要意义^[3]。目前,以小流域为单元进行综合治理,已成为中国增强流域整体效能的核心途径^[4]。生态清洁小流域是传统小流域综合治理模式的深化和精进^[5]。指以小流域的水土保持工作为重心,以遵循因地制宜为原则,基本达成资源合理利用、生态平衡与经济社会繁荣协同发展的目标^[6]。生态清洁小流域综合效益是衡量小流域建设后发挥固土保土作用,促进流域内经济水平、生态资源和社会资源全面提升的总贡献^[4]。生态清洁小流域综合效益评价不仅是衡量小流域现状和成果的有效尺度和客观标准,也是评估治理方案和政策可行性的基本原则和重要方式,可为实现流域内可持续、协调和稳定发展提供科学依据^[7]。

自 20 世纪 90 年代初,中国学者秉持着对生态、经济及社会三大维度效益的综合考量,单一的评估手段与多元化的评估方法相融合,开展生态清洁小流域综合效益评价工作。例如,关进平等^[8]通过熵值法分析了影响昌化江流域系统可持续发展的重要指标和重点关注地区。郑国权等^[9]结合广东瑶安小流域受

灾情况和治理目标,利用模糊数学综合评判法构建评价模型,并论证了所提出的效益评价指标体系和方法在当地的实用可行性。张磊等^[10]提出 14 个能够反映赣县枳田小流域状况的关键指标,并确定小流域生态清洁评价等级。魏强等^[11]以半干旱黄土丘陵区小流域为研究对象,将层次分析法与灰色系统理论相结合,通过构建现有流域治理效果的最优数列评估其治理成效;戴全厚等^[12]运用递阶多层次综合评价法与线性加权法相结合的方法,评判小流域可持续发展现状,针对性地提出区域发展策略。以上评价方法多是对治理后的小流域现状进行评价,因此有必要引入系统障碍度模型,对小流域建设的影响因素进行分析,进一步识别小流域生态建设中的制约因子,提高评价的准确性和针对性。

北京市北部山区小流域是城市的生态屏障,兼具水源涵养、区域气候调节、农业生产等重要功能和价值,对首都经济社会的长远发展具有战略价值和深远意义,对促进可持续发展起到至关重要的作用。但由于北京市山区地形复杂,降雨较为集中等因素,水土流失较为严重。近年来随着人们的开发利用,小流域面临农业生产条件衰退,水环境受损加剧等问题。2004 年以来,北京市全市山区内因地制宜开展生态清洁小流域的建设,通过构筑“预防保护区、综合治理

区、生态修复区”3道防线,采用河岸带治理、水保造林、梯田整修等工程、生物及农业耕作措施相结合的方法,在小流域水土流失治理及水环境修复方面不断地进行探索和实践,目前取得了一定的治理效果。因此,有必要对区域治理进行效益评价及障碍因素分析,从而推动后续小流域治理策略的调整和完善。

本研究从北京市延庆、怀柔、密云和昌平区分别选取 1 条具有代表性的小流域,从生态、经济和社会效益出发,构建符合该地区特征的综合评价指标体系框架,采用模糊数学理论、综合指数法和层次分析法,对北京北部山区小流域的治理程度进行定性和定量相结合的评价研究,并引入系统障碍度模型,识别影响小流域发展的障碍因子,以期为北京市山区小流域综合治理提供数据支撑和科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

北京市北部山区属燕山山系,西起关沟,东跨昌平、延庆、怀柔、密云等区内。该区域总面积约 7 000 km²,占全市面积的 43%。由于山体陡峭,岩体破碎,加上气候条件,北京市水土流失较为严重的地区也主要集中在北部山区。据统计,新中国成立之初,该地区小流域水土流失面积达 1 650.01 km²,占总面积的 23.57%。20 世纪 90 年代以来,随着地区的开发利用,河道水质污染严重,部分地区土壤结构和植被遭到破坏,径流发生改变,极易发生泥石流、滑坡等地质灾害。因此,北部山区各小流域严格遵守北京市倡导的生态清洁小流域建设策略,推进各项治理工作。本研究选取 2021 年度小流域治理工作的典范(见图 1),包括延庆区的碓臼石小流域、怀柔区的鱼水洞小流域、密云区的古北口小流域以及昌平区的葫芦河小流域,全面评估其工作实施后的成效。4 条小流域的基本情况及其主要治理措施如下。

(1) 碓臼石小流域位于延庆区东南部井庄镇,包含北地村、西三岔村、碓臼石村、门泉石村 4 个村庄。小流域沟谷深切,为典型的“V”型谷。土壤质地以轻壤质、砂质为主。土层较瘠薄,卵砾石含量较大,适宜板栗、扁杏、核桃等经济林果的种植。小流域总面积 39.55 km²,2021 年治理面积为 10 km²。主要措施包括:①综合治理区。梯田整修 1.25 hm²,经济林种植 583 株,村庄美化 3 200 m²,护坡 56 m。②生态修复区。北地村沟道生态修复 282 m,西三岔沟道生态修复 206 m,门泉石村沟道生态修复 144 m。

(2) 鱼水洞小流域隶属于怀柔区琉璃庙镇,涉及鱼水洞一个行政村。地势东高西低,最高海拔约

1 270.6 m,最低海拔约 405.9 m。年平均降水量 585 mm。小流域所在的琉璃庙镇素有“琉璃山水、秀甲京北”的美誉。近年来,鱼水洞村及附近山区旅游业发展也较为快速。小流域总面积 18.62 km²,2021 年治理面积 6 km²。主要措施包括:预防保护区:以自然修复为主;综合治理区:梯田 1.82 hm²,树盘 150 个,挡土墙 400 m,田间生产道路 1 215 m;生态修复区:河岸带治理 0.03 hm²。

(3) 古北口小流域位于密云区古北口镇,区域内有古北口村 1 个行政村。小流域所属燕山山脉,海拔高程 205~430 m,流域主沟道长 8.82 km。小流域多年平均降雨量为 638.4 mm。小流域内土壤以褐土为主,主要果林种植有杏、桃、等,适宜发展粮棉生产和营造果园。小流域总面积 12.38 km²,2021 年治理面积为 7.0 km²。主要措施包括:预防保护区:以封育保护为主,面积为 7.23 km²;综合治理区:梯田整修 3.00 hm²,挡土墙 343 m,排水工程 310 m,村庄美化 3 405 m²;生态修复区:沟道自然生态修复。

(4) 葫芦河小流域位于昌平区中东部,主要涉及乡镇有小汤山镇,区域内村庄包括大汤山村、小汤山村、大柳树村等。小流域多年平均降雨量 550.3 mm,大部分地区为较强富水区。小流域整体地形平坦,高程在 34.4~39.3 m 之间,流域内分布着成片的居民村落,部分河道两岸堆积有村庄拆迁产生的建筑垃圾。小流域总面积 11.17 km²,2021 年治理面积为 3.0 km²。主要措施包括:综合治理区:村庄绿化美化 5 067 m²,新建雨水管 47 m;生态修复区:村庄沟道生态修复 2 436 m,新建过路涵管 3 座。

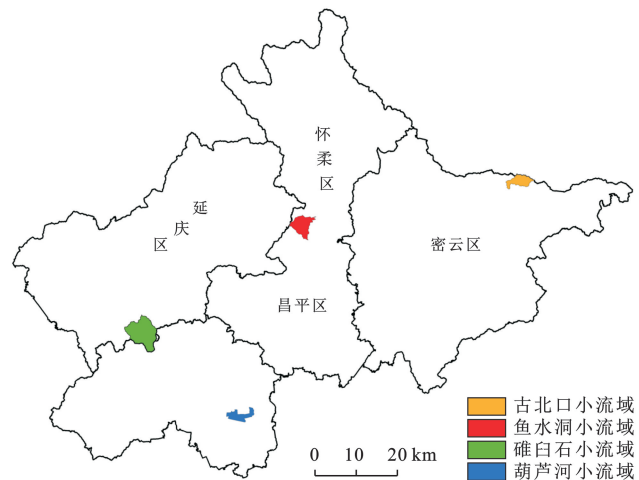


图 1 研究区域地理位置及典型小流域

Fig.1 Geographical location and typical small watersheds of study area

1.2 数据来源

小流域土地利用基于 2020 年和 2022 年的高分

2号遥感影像(空间分辨率 1 m)和地拓遥感协同解译平台。首先进行目视解译,其次对解译结果进行现场核实,保证每条小流域覆盖全部土地利用类型,对边界难以判断或遥感识别不清之处全部复查,最终利用地信软件完成治理小流域土地利用制图(CGCS 2000 地理坐标系,Albers 投影)。土地利用类型分为 7 类:住宅用地、农田、水体、林地、草地、裸土地和道路。

根据小流域 2020 年和 2022 年的高分 2 号遥感影像(空间分辨率 1 m)和土地利用类型,利用归一化指数(NDVI)对小流域林草覆盖率进行估算。同时,结合野外样方调查,对基于遥感影像估算的林草覆盖率进行校正,最后建立多指数林草覆盖率回归公式。野外植被调查过程中,在每条治理小流域上、中、下游选取 3 个验证点,乔木层调查以 20 m×20 m 为最小调查单元,在样地内对乔木进行每木测量,调查内容包括单株树种、胸径、树高、冠幅、树干形态;灌木层在乔木调查单元内随机取 3 个 5 m×5 m 的样方,调查灌木种类、高度、盖度、地径、株数、优势度、生长状况、病虫害状况等指标;在灌木调查单元内随机选取 3 个 1 m×1 m 的草本层样方进行调查。林草覆盖率回归公式为:

$$FVC_{\text{乔}} = 0.4 - 0.716VI + 0.422SAVI + 1.266MSAVI - 1.045ARVI \quad (1)$$

$$FVC_{\text{草}} = 0.091 + 0.735VI - 0.006RVI - 1.367NDVI + 1.156MSAVI + 0.151ARVI \quad (2)$$

$$FVC_{\text{灌}} = 0.15 - 0.019VI - 0.325NDVI + 1.269MSAVI - 0.524ARVI \quad (3)$$

式中: $FVC_{\text{乔}}$ 为乔木郁闭度; $FVC_{\text{灌}}$ 为灌木覆盖度; $FVC_{\text{草}}$ 为草本覆盖度; VI 为植被指数; $SAVI$ 为土壤调整植被指数; $NDVI$ 为归一化植被指数; $MSAVI$ 为修改后的土壤调整植被指数; $ARVI$ 为大气阻抗植被指数; RVI 为比值植被指数。

采用小流域野外调查和地拓遥感解译相结合的方式,利用土壤流失厚度和流域面积估算小流域的面蚀量和沟蚀量,以此计算土壤侵蚀模数。公式为:

$$E = \frac{Q_{\text{面}} + Q_{\text{沟}}}{F} \quad (4)$$

式中: E 为土壤侵蚀模数; $Q_{\text{面}}$ 为小流域内面蚀量; $Q_{\text{沟}}$ 为小流域内沟蚀量; F 为小流域面积。

本研究 TN, TP, COD 等水质浓度数据根据《环境监测规范》(SL 219—2013)和《生态清洁小流域技术规范》(DB11/T 548—2008)的规定进行采样,并在 24 h 内送专业水质检测单位进行测定得出。小流

域治理前后产水量数据由 InVest 模型计算得到。模型使用的 2020 和 2022 年小流域 DEM 数据、小流域划分数据、河道数据、土壤质地、土地利用数据、植被盖度数据和节点数据由北京市水生态保护与水土保持中心提供。经济数据(人均纯收入、经济投产比、土地生产率)源于各区统计年鉴,并通过实地走访统计小流域内行政村的各业收入及土地产量状况。社会效益数据(恩格尔系数、土地利用效率、乡村从业人员比例)主要源于小流域内居民 2020, 2022 年各区统计年鉴。

1.3 评价指标体系的构建

在构建小流域评价指标体系时,除了遵循科学性、相对独立性、复合层次性等原则^[13-14],还根据研究区域的主要特征、治理目标以及评价目的,全面、真实和定量地反映流域治理前后综合效益的变化程度。本研究综合效益评价指标体系分为 3 个层次,包括目标层(A)、准则层(B)和指标层(C)。在北京市北部山区小流域的治理中,水生态环境和水源保护一直是建设工作的重中之重,北京市也相继提出清洁、卫生、生态小流域等小流域综合治理理念来应对水污染的问题。因此,从可持续发展的内涵出发,本研究准则层主要包括水质提升效益、生态效益、经济效益和社会效益等 4 个方面。在指标选择时,依据指标代表性、系统性、客观性、科学性、可操作性等原则,结合北京市北部山区小流域的自然禀赋、经济状况和区域特性,并考虑了治理措施对小流域当前问题和目标的符合度,采用频数统计法统计以往相关论文中使用频率较高的指标,尽可能全面地对指标进行初选;其次,根据独立性分析、对比分析法以及专家打分等方法,由上至下对初选指标进行筛选;最后,征求专家意见确定 13 项作为北京市北部山区生态清洁小流域建设效益评价体系的指标^[15](表 1)。

1.4 评价方法

1.4.1 评价指标权重的确定 确定指标权重是权衡各指标相对重要性的过程,可以反映各指标对体系的影响程度。本研究结合专家打分,采用层次分析法确定指标的权重。通过参考 1~9 比例标度法构造判断矩阵^[16],并对各矩阵进行一致性检验。当 A 层次因素与下一层次因素 B_N 有联系时,公式为:

$$P_A(k) = b_{ij} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: $P_A(k)$ 表示判断矩阵; b_{ij} 表示 $P_A(k)$ 中的元素。

表 1 北京市北部山区生态清洁小流域综合效益评价指标权重
Table 1 Weights of comprehensive benefit evaluation indexes for ecologically clean watersheds at mountainous areas in Northern Beijing City

目标层	准则层		指标层	
	子系统	各子系统的权重	指标	各指标权重
生态清洁小流域综合效益评价(A)	生态效益子系统(B ₁)	0.233	水土流失治理度(C ₁)	0.127
			林草覆盖率(C ₂)	0.054
			土壤侵蚀模数(C ₃)	0.032
			产水量(C ₄)	0.019
	经济效益子系统(B ₂)	0.138	人均纯收入(C ₅)	0.077
			经济产投比(C ₆)	0.044
			土地生产率(C ₇)	0.017
	社会效益子系统(B ₃)	0.084	恩格尔系数(C ₈)	0.052
			土地利用度(C ₉)	0.020
			农村从业人员比例(C ₁₀)	0.011
	水质提升效益子系统(B ₄)	0.545	COD 含量(C ₁₁)	0.341
			TN 含量(C ₁₂)	0.130
			TP 含量(C ₁₃)	0.074

表 2 研究小流域综合效益评价指标定义及无量纲化函数类型

Table 2 Definition of comprehensive benefit evaluation index and dimensionless function type of small watershed in study area

评价指标	定义	无量纲化函数类型
水土流失治理度(C ₁)/%	水土流失治理达标面积占总面积的百分比	极大最优
林草覆盖率(C ₂)/%	林草植被面积占土地总面积之比	极大最优
土壤侵蚀模数(C ₃)/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积土壤和土壤母质在单位时间内的侵蚀量大小	极小最优
产水量(C ₄)/(m ³ ·km ⁻² ·a ⁻¹)	小流域一定时间内总产水量	极小最优
人均纯收入(C ₅)/(yuan·a ⁻¹)	居民当年的总收入相应地扣除有关费用性支出后的收入总和	极大最优
经济产投比(C ₆)	小流域内经济投入与产出之间的比值	极大最优
土地生产率(C ₇)/%	一定时期内小流域土地总产量或总产值与土地总面积之比	极大最优
恩格尔系数(C ₈)/%	居民消费中食物支出与总支出金额之比	极小最优
土地利用度(C ₉)/%	小流域内已利用土地与土地总面积的比值	极大最优
农村从业人员比例(C ₁₀)/%	小流域内农村从业人员与农村总人口的比值	极大最优
COD 含量(C ₁₁)/kg	河道内 COD 浓度与小流域年产水量的乘积	极小最优
TN 含量(C ₁₂)/kg	河道内 TN 浓度与小流域年产水量的乘积	极小最优
TP 含量(C ₁₃)/kg	河道内 TP 浓度与小流域年产水量的乘积	极小最优

1.4.3 各级系统效益评价价值的确定 生态清洁小流域评级体系结构具有多因素、多层次、多指标的特点^[17]。本研究采用加权综合指数法由下至上计算每个指标对各级子系统的影响,最后对整个系统进行全面的评价。

$$I = \sum_{i=1}^m \omega_i \sum_{j=1}^n \omega_{ij} E_{ij} \quad (8)$$

式中: I 为生态清洁小流域全系统评价价值; E_{ij} 为第 i 个子系统中第 j 个指标的评价价值; ω_{ij} 为第 i 个子系统中第 j 个指标在该层级所占的权重系数; ω_i 为第 i

1.4.2 评价指标归一化处理 为解决指标量纲不统一的问题,借用模糊数学理论,引入隶属函数对指标原始值进行无量纲化。梯形函数作为隶属函数的一种,其包括半升函数和半降函数(表 2)。函数的上、下阈值(x_{ia}, x_{ib})是基于区域效益调查,并结合相关标准和专家意见确定。

半升函数用于评价一定范围内数值越大越好的指标,公式为:

$$E_i = \begin{cases} 0 & (x_{ij} \leq x_{ia}) \\ \frac{x_{ij} - x_{ia}}{x_{ib} - x_{ia}} & (x_{ia} \leq x_{ij} \leq x_{ib}) \\ 1 & (x_{ij} \geq x_{ib}) \end{cases} \quad (6)$$

半降函数用于评价一定范围内数值越小越好的指标,公式为:

$$E_i = \begin{cases} 1 & (x_{ij} \leq x_{ia}) \\ \frac{x_{ib} - x_{ij}}{x_{ib} - x_{ia}} & (x_{ia} \leq x_{ij} \leq x_{ib}) \\ 0 & (x_{ij} \geq x_{ib}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_{ia} 为指标 x_{ij} 的下限阈值; x_{ib} 为指标 x_{ij} 的上限阈值。

子系统在该层级所占的权重系数。

1.4.4 系统评价等级 对生态清洁小流域系统进行评价分级可以直接明晰系统状态。参考文献[18]和专家意见,以模糊数学理论为基础,把评价总指数划分成几个连续区间等级,总指数相近的流域在隶属关系上界定为同一发展状态。本研究将评价总指数划分为 4 个等级:[0,0.5)为未达标状态;[0.5,0.65)为初级状态;[0.65,0.75)为初级状态;[0.75,1)时评定为高级状态(表 3)。

表 3 生态清洁小流域系统评价等级标准

Table 3 Evaluation grade criteria for ecologically clean watershed systems

评价总指数	系统等级
[0,0.5)	低级系统,即流域综合治理未达标准,系统处于恶性循环
[0.5,0.65)	初级系统,即流域综合治理已达初级标准,系统各项效益逐渐改善
[0.65,0.75)	中级系统,即流域综合治理已达中级标准,系统各项效益明显改善
[0.75,1)	高级系统,即流域综合治理已达高级标准,各项效益协调发展,系统处于良性循环

1.4.5 系统障碍度模型 在生态清洁小流域效益评价的基础上,对北京市北部山区小流域的发展进行病理诊断,便于识别小流域生态建设中的薄弱点,为优化小流域治理工作提供决策参考。引入障碍度模型,采用因子贡献度、指标偏离度和障碍度对小流域进行分析诊断,计算公式为:

$$I_j = 1 - Y_j \quad (9)$$

$$O_j = \frac{I_j F_j}{\sum_{j=1}^n I_j F_j} \quad (10)$$

式中: I_j 为第 j 个指标与小流域发展目标的差距,即 100%与指标标准化值之差; Y_j 为第 j 个指标的标准化值; O_j 为第 j 个指标对小流域发展的影响程度; F_j 为第 j 个指标的因子贡献度,即指标对总目标的权重。

2 结果与分析

2.1 生态清洁小流域综合效益评价

2.1.1 指标评价值 北京市北部山区生态清洁小流域综合效益评价指标权重如表 1 所示。体系的准则层中,水质提升效益所占比重最大,达到 0.545,其次是生态效益和经济效益,所占比重分别为 0.233,0.138,社会效益的权重最小为 0.084。说明短期内,各项治理措施对小流域的水质安全和生态环境产生了直接影响。值得注意的是,本研究在工程建设后的 1 a 开展,各项建设措施还未充分发挥其作用,而对于小流域长期的可持续发展而言,各效益权重与发展阶段密切相关。

将北京市北部山区生态清洁小流域各指标进行无量纲化处理,得到各指标的归一化评价值(图 2)。2020—2022 年,4 条小流域水质提升、生态、经济、社会子系统的各项指标基本呈现上升的趋势。水质提升子系统中,各小流域 TN 含量改善的增幅最快,碓臼石、鱼水洞、古北口以及葫芦河小流域依次为 17%,46%,22%和 25%。小流域内水质的明显提升主要得益于“生态修复区”沟道生态修复以及“综合治理区”农田排水工程和村庄绿化美化的建设。

生态子系统中,鱼水洞、古北口以及葫芦河小流域的产水量评价指标增幅最大,浮动比例为 22%~38%。尽管多个小流域的产水量改善程度较为快速,但仍低于各小流域治理后的水土流失治理度评价值。

这主要得益于水土保持工作的开展。小流域内针对“预防保护区”,以封育保护为主,“综合治理区”通过修建护坡、挡土墙,加修树盘等措施,使土壤抗蚀能力增强,保水能力不断提升。

经济子系统中,碓臼石、鱼水洞、古北口以及葫芦河小流域的经济投产比增幅最为明显,分别为 15%,60%,47%和 33%。各小流域治理后人均纯收入评价值最高。其原因在于小流域通过梯田的修缮和田间生产道路等措施,改善了经济林和农田的水土流失状况和土地生产条件,以及各小流域旅游业、经济林和特色农业的发展,使得小流域内经济投产比和人均纯收入提高。

社会子系统中,碓臼石、鱼水洞、古北口以及葫芦河小流域的土地利用率评价指标增幅不大,浮动比例为 1%~3%。主要原因在于:采用整修梯田、挡土墙、田间生产道路的工程措施,使得小流域土地资源得到更为合理的规划和利用;同时,小流域建设和管护工作为农民提供了工作机会,增加了农民的收入水平。社会效益各指标增幅随治理年限的增加而发挥更大的效益。

2.1.2 子系统评价值及系统综合评价等级 小流域作为一个复合系统,其综合治理成效由水质提升、生态、经济、社会效益共同决定。从整体情况来看(图 3),小流域综合效益在治理后均有所提高,各子系统效益值表现为:水质提升效益>生态效益>经济效益>社会效益。短期内,北京市北部山区小流域综合水平的提高,主要通过改善流域内的水环境状况和加强水土保持治理来实现。

对比 4 条小流域的综合效益评价值及增幅比例表现为:葫芦河小流域(22%)>古北口小流域(15%)>鱼水洞小流域(12%)>碓臼石小流域(11%)。综合效益增幅的不同具体表现在各小流域子系统提升水平的差异。葫芦河小流域经治理后由初级标准提升至中级标准,主要由于水质提升效益和生态效益的改善促进综合效益的增加,两子系统的增幅分别为 32%和 19%;古北口小流域经治理后达到初级标准,其经济效益和水质提升效益增幅较大,浮动比例分别为 20%和 19%;鱼水洞小流域综合评价指数由 0.51

提至 0.58, 目前达到初级标准, 其中, 小流域经济效益增幅达 25%, 水质提升效益增幅为 13%; 碓白石小流

域也已达初级标准, 其生态效益和经济效益增幅较大, 增幅分别为 18% 和 14%。

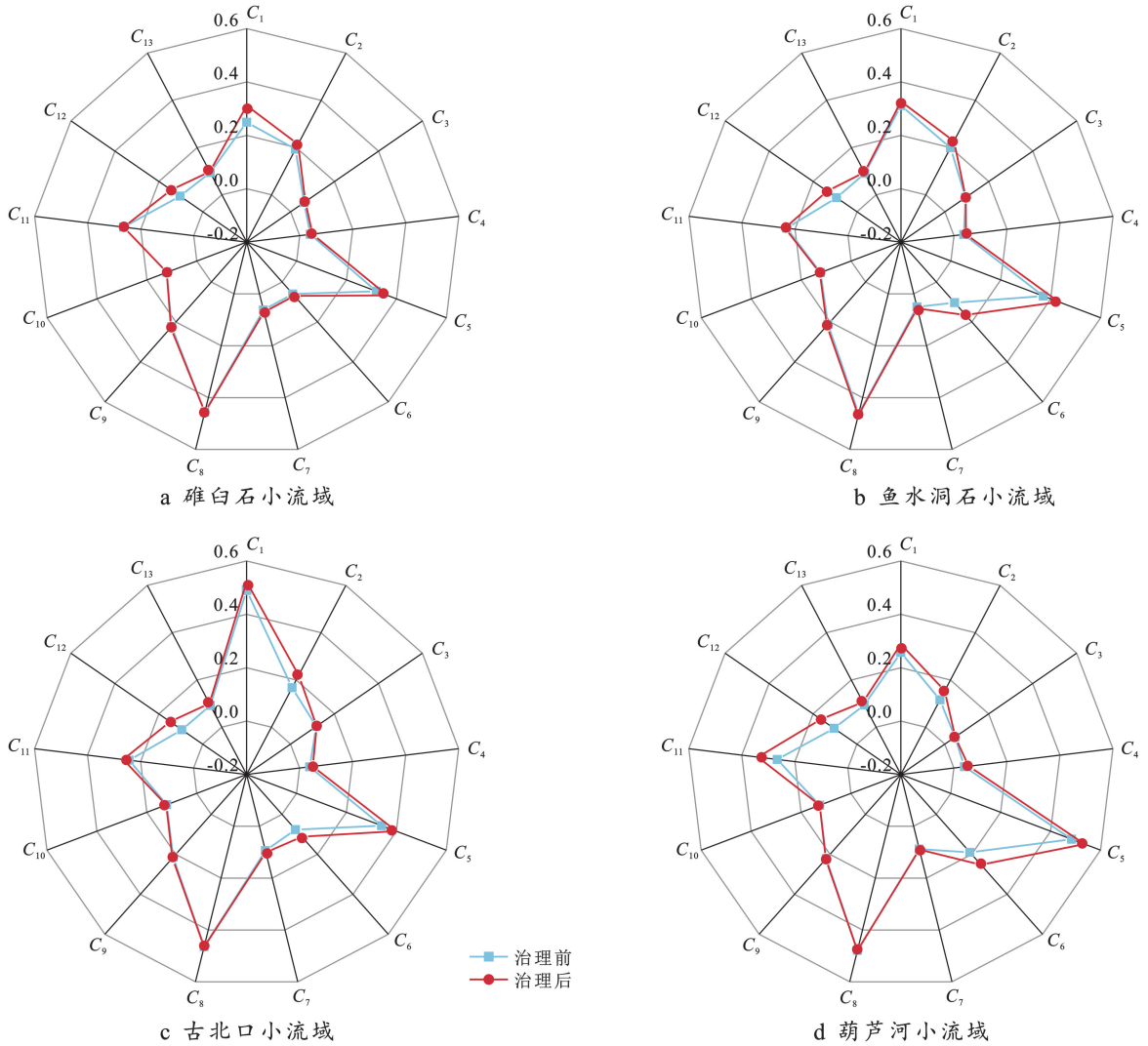
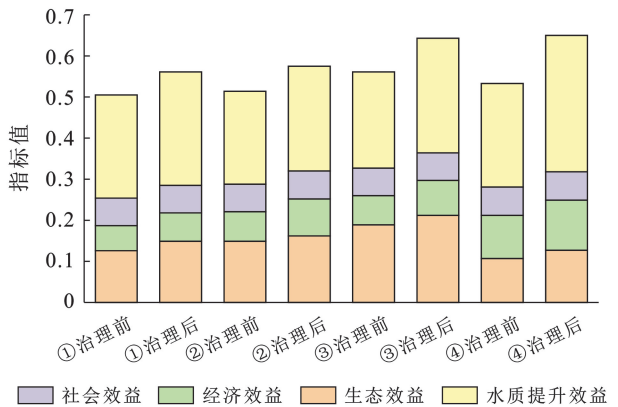


图 2 各小流域归一化综合效益指标评价值
Fig.2 Evaluation value of normalized comprehensive benefit index of each small watershed



注: ①碓白石小流域; ②鱼水洞小流域; ③古北口小流域; ④葫芦河小流域。下同。

图 3 各小流域子系统效益指标评价结果
Fig.3 Evaluation results of benefit indicators of subsystems in each small watershed

2.2 生态清洁小流域发展影响因素分析

通过系统障碍度模型计算研究区域各影响因子的障碍度(图 4)。图 4 中颜色越深代表该因素对小流域发展的影响程度越大。4 条小流域治理前后各影响因子的障碍度变化存在差异。生态子系统中, 碓白石、鱼水洞和古北口小流域的林草覆盖率因子障碍度结果显著降低。同时, 4 条小流域的土壤侵蚀模数因子障碍度结果均有所上升, 浮动范围为 0.04~0.31, 这表明人们虽然通过耕作、工程以及植物措施缓解了小流域的水土流失, 但随着北京市极端天气频率的增加, 还需继续夯实土壤侵蚀的治理强度。

经济子系统中, 4 条小流域的人均纯收入因子障碍度结果显著降低。同时, 碓白石和古北口小流域经济投产比障碍度明显增加, 障碍度变化值分别为 0.09, 0.05。鱼水洞和葫芦河小流域土地生产率障碍

度明显增加,浮动值分别是 0.05,0.02。因此,小流域在经济调整的同时还需进一步完善小流域资源配置,强化小流域经济开发的管理机制。

社会子系统中,对白石、鱼水洞和古北口小流域的土地利用率因子障碍度显著降低。葫芦河小流域的土地利用率因子障碍度虽然有上升趋势,但是在该流域的社会子系统的指标中增幅最小。4 条小流域的恩格尔系数因子障碍度均呈现增加的趋势,乡村从业人员比例的障碍度除鱼水洞小流域外也呈现上升的态势。随治理年限的增加,还应持续关注小流域对人居生活质量和水平的影响。

水质提升子系统中,4 条小流域的 COD 含量的因子障碍度均呈现上升趋势,浮动范围为 0.06~0.16。相反地,TN 含量的因子障碍度均呈现下降趋势,浮动比例在 0.19~0.26 之间。

综上所述,北京市北部山区小流域在未来的发展过程中,生态效益应关注土壤侵蚀模数,经济效益应关注经济投产比和土地生产率,社会效益应关注恩格尔系数和乡村从业人员比例,水质提升效益应关注 COD 含量。

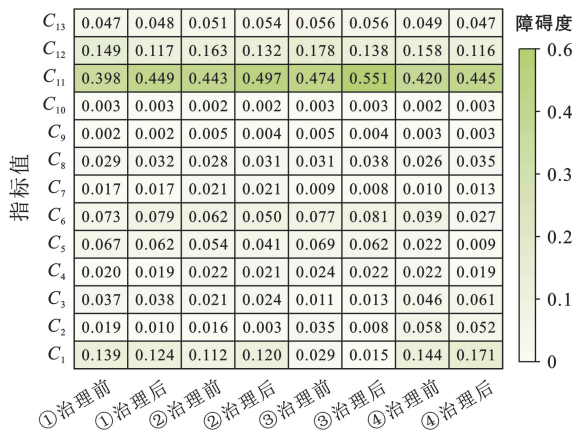


图 4 各小流域障碍因子障碍度结果

Fig.4 Results of obstacle factor obstacle degree in each watershed

3 讨论

在小流域综合效益评价指标体系中,治理后各小流域的综合效益均有所提高。其中,水质提升效益和生态效益所占权重较高,且小流域各子系统效益值表现为:水质提升效益>生态效益>经济效益>社会效益。这充分说明北京市北部山区生态清洁小流域建设主要通过水环境改善和水土流失治理来发挥综合效益。目前较多研究采用“生态、经济、社会”3 大效益进行小流域治理的效益评价分析^[19],而本研究增加了水质提升效益,主要原因是这与北京市北部山区小流域目前所面临的水环境日益恶化的重要问题相

符合,且北京市生态清洁小流域建设措施规划和布设的主要原则就是以安全为基础,以生产高质量水源为导向^[20]。因此,本研究构建的 4 大效益评价体系具有一定的区域适宜性。通过本评价结果可知,4 条小流域进行治理后综合建设均已达到初级以上标准,这与已研究的结果相似^[21-22],且与实地调查结果相吻合,说明本评价方法是可行的。

葫芦河小流域经本次治理后综合效益得到了较为明显的改善,综合评价指数由 0.53 上升至 0.65,小流域由初级系统提升至中级系统。本研究发现,葫芦河小流域水质提升效益和生态效益的增幅在 4 条小流域中最为突出,增长比例分别为 32% 和 19%。两效益的指标层中,TN 含量和产水量治理增幅分别达到 25% 和 38%。说明葫芦河小流域很大程度上通过水资源保护来促进综合效益的提升。葫芦河小流域整体地形平坦,大部分地区为较强富水区且分布着成片的居民村落。此前,小流域河道两岸堆积着建筑垃圾,严重影响了小流域水环境的安全。本次治理通过对村庄内 5 067 m² 的区域进行绿化美化并加强雨水管网的布设,既能提高水资源利用率,又能减少了地表径流中携带的污染物含量,有效降低了面源污染的风险;其次,对“生态修复区”约 2 400 m 的沟道进行植被修复,有效提升小流域内水质,从而达到改善水环境的目的。

在该次生态清洁小流域建设 1 a 后,古北口小流域综合效益提升了 15%,增幅仅次于葫芦河小流域,小流域系统目前已达到初级标准。本研究发现,小流域经济效益子系统和水质提升效益子系统分别增长了 20% 和 19%。两效益的指标层中经济投产比和 TN 含量增幅最突出,分别增加 47% 和 22%。值得一提的是,小流域生态效益子系统中林草覆盖率和产水量也有较大幅度的提升,增幅均为 32%。结合本文研究结果以及小流域治理情况可以推测小流域取得较大成效的原因。一方面,小流域梯田和挡土墙的整修使水土流失区域变为农田和林地,促进了小流域内粮棉和果园产量的增加,经济投产比明显提升。另一方面,小流域对“预防保护区”7.23 km² 的区域进行封育保护,有效增加了林草覆盖率,控制了产水量;对“生态修复区”封河育草、加强河道管理和维护,使得小流域水质得到改善。

鱼水洞小流域在本次治理后综合效益整体提升 12%,目前小流域系统已达到初级标准。通过效益评价体系可知,鱼水洞小流域综合水平的改善与经济子系统和水质提升子系统密切相关,两子系统增幅分别为 25% 和 13%。而在指标层中,经济投产比和 TN

含量治理增幅高达 60% 和 46%。两指标的大幅提升是政府经济发展战略和生态清洁小流域建设坚持可持续理念的结果。鱼水洞村作为怀柔区的低收入村重点扶持对象,近年来木耳种植等特色农业和旅游业的发展是推动小流域经济的重要途径。2018 年怀柔区生态清洁小流域建设中,对鱼水洞小流域内“综合治理区”和“生态修复区”采取了梯田、防护坝等整修工程,有效改善了流域内水环境和水土流失状况^[23]。本次建设中,“综合治理区”包括对田间生产道路修缮 1 215 m,对梯田和挡土墙整修以及砌筑树盘 150 个,这些措施在改善生产环境的同时也促进了农业生产效率,增加了农产品的收获率,经济投产比得到提升。同时,对“生态保护区”进行河岸带治理,改善了水质 TN 含量。

对白石小流域综合效益评级值由 0.51 提升至 0.56,增幅为 11%。本文研究发现,小流域生态和经济子系统增幅分别为 18% 和 14%,对综合效益提升贡献较大。指标层中,水土流失治理度增幅为 25%,经济投产比增幅为 15%。小流域内土层较瘠薄,卵砾石含量较大,适宜板栗、扁杏、核桃等经济林果的种植。本次小流域治理过程中,经济林种植 583 株并配备梯田和护坡的整修,通过生物措施和工程措施相结合的方法有效控制了水土流失。同时,经济林的种植改善了经济结构,使得小流域内经济投产比得到了提升。

根据障碍度模型分析可知,北京市北部山区小流域在未来的发展过程中,生态效益应关注土壤侵蚀模数,经济效益应关注经济投产比和土地生产率,社会效益应关注恩格尔系数和乡村从业人员比例,水质提升效益应关注 COD 含量。因此,在今后北京市北部山区小流域的管理中,还可以通过以下两方面推动小流域的稳定发展:①鼓励农民参与到生态清洁小流域的管护工作当中,一方面可以培养村民的环保意识,另一方面增加农民就业机会,实现农民致富和生态保护双赢是推动小流域可持续发展的关键。②通过举办培训班、现场指导等方式,加强农民培训和教育工作,推广先进的农业技术和种植模式;积极开拓农产品市场,建立稳定的销售渠道,关注市场需求变化,及时调整种植结构和品种选择,推动小流域土地生产率和经济投产比的提高。

4 结论

(1) 本次生态清洁小流域建设后,4 条小流域的整体水平均有较大的提升。葫芦河小流域综合评价指数由 0.53 提升至 0.65,小流域系统等级由初级标准提升至中级标准;碓白石小流域、鱼水洞小流域和

古北口小流域综合效益增幅分别提升 11%,12% 和 15%,综合建设均已达到初级标准。

(2) 本研究引入障碍度模型,通过因子贡献度、指标偏离度和障碍度的计算,对各项指标进行病理学诊断,从而了解北京市北部山区小流域发展的阻碍因素。相比于传统生态清洁小流域综合效益评价,障碍度模型将不同影响因子的贡献度进行量化比较,提高了评价的准确性。同时,通过障碍度模型可以精确找出制约小流域发展的主要问题,为后续治理工作提供有针对性的指导。

(3) 通过障碍度模型得知,2021 年治理前,北京市北部山区生态清洁小流域各子系统的主要障碍因子分别为水土流失治理度、COD 含量、经济投产比和恩格尔系数。在建设过程中,通过对“预防保护区”进行封育保护,“生态修复区”进行沟道生态修复,“综合治理区”采取工程、生物及农业耕作措施相结合的治理手段,使得小流域土壤抗蚀能力增强,水环境提升,经济林和农田的土地生产条件得到改善,同时小流域建设和管护工作为农民提供了工作机会,增加了农民的收入水平。小流域各子系统的主要障碍因子得到一定的治理。

参考文献 (References)

- [1] 胡世明,陈瑾.中国水土流失防治机制的构建与发展[J].水利经济,2017,35(5):1-6.
Hu Shiming, Chen Jin. Establishment and development of prevention and control mechanism of water loss and soil erosion in China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(5): 1-6.
- [2] 祁生林.生态清洁小流域建设理论及实践:以北京市密云县为例[D].北京:北京林业大学,2006.
Qi Shenglin. Study on the ecoclean small watersheds construction theory and practice: Taking Miyun County in Beijing as an example [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.
- [3] 肖娟花,于兴修,马方正,等.生态清洁小流域综合效益评价研究进展[J].中国水土保持,2020(3):62-65.
Xiao Juanhua, Yu Xingxiu, Ma Fangzheng, et al. Progress of study on integrated benefit evaluation of ecological and clean-type small watersheds [J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(3): 62-65.
- [4] 董仁才,余丽军.小流域综合治理效益评价的新思路[J].中国水土保持,2008(11):22-24.
Dong Rencai, Yu Lijun. New train of thought on benefit evaluation of integrated treatment of small watersheds [J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(11): 22-24.

- [5] 李建华,袁利,于兴修,等.生态清洁小流域建设现状与研究展望[J].中国水土保持,2012(6):11-13.
Li Jianhua, Yuan Li, Yu Xingxiu, et al. Present situation and research prospect of ecological clean small watershed construction [J]. Soil and Water Conservation in China, 2012(6):11-13.
- [6] 毕小刚,杨进怀,李永贵,等.北京市建设生态清洁型小流域的思路与实践[J].中国水土保持,2005(1):18-20.
Bi Xiaogang, Yang Jinhui, Li Yonggui, et al. Reasons and practice on establishing ecological and clean-type small watersheds in Beijing Municipality [J]. Soil and Water Conservation in China, 2005(1):18-20.
- [7] 卜贵贤,李凯荣,周俊.陕南秦巴山区小流域水土保持治理综合效益评价[J].水土保持研究,2011,18(6):231-235.
Bu Guixian, Li Kairong, Zhou Jun. Evaluation of comprehensive benefit of soil and water conservation in the small watershed in Qinling-Bashan Mountains of Southern Shaanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(6):231-235.
- [8] 关进平,余济云,郭霞,等.昌化江流域生态经济可持续发展评价[J].中南林业科技大学学报,2012,32(3):89-93.
Guan Jinping, She Jiyun, Guo Xia, et al. Evaluation of eco-economical sustainable development in Changhua River basin [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012,32(3):89-93.
- [9] 郑国权,杨宪杰,温美丽,等.广东省小流域综合治理效益的定量评价:以清远市瑶安小流域为例[J].水土保持通报,2016,36(4):237-243.
Zheng Guoquan, Yang Xianjie, Wen Meili, et al. Quantitative evaluation of benefits from comprehensive watershed harness: A case study of Yao'an small watershed of Qingyuan City in Guangdong Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(4):237-243.
- [10] 张磊,郑委,谢颂华,等.小流域生态清洁评价分级标准研究[J].江西水利科技,2017,43(5):342-347.
Zhang Lei, Zheng Wei, Xie Songhua, et al. Study on grading standards of ecological cleaning assessment in small watershed [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2017,43(5):342-347.
- [11] 魏强,柴春山.半干旱黄土丘陵沟壑区小流域水土流失治理综合效益评价指标体系与方法[J].水土保持研究,2007,14(1):87-89.
Wei Qiang, Chai Chunshan. Index system and method on comprehensive effects evaluation of small basin water-soil loss control in semiarid loess hill-valley areas [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,14(1):87-89.
- [12] 戴全厚,刘国彬,刘明义,等.小流域生态经济系统可持续发展评价:以东北低山丘陵区黑牛河小流域为例[J].地理学报,2005,60(2):209-218.
Dai Quanhou, Liu Guobin, Liu Mingyi, et al. An evaluation on sustainable development of eco-economic system in small watershed in hilly area of Northeast China [J]. Acta Geographica Sinica, 2005,60(2):209-218.
- [13] 周振民.基于模糊综合评判法水环境评价及其可靠性分析[J].中国农村水利水电,2009(5):15-17.
Zhou Zhenmin. Water environment evaluation based on the fuzzy comprehensive method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(5):15-17.
- [14] 徐尚荣.基于熵值法的青海省科技创新能力评价研究[J].青海大学学报(自然科学版),2011,29(1):96-102.
Xu Shangrong. Entropy-based innovation capability evaluation of science and technology in Qinghai [J]. Journal of Qinghai University (Nature Science), 2011, 29(1):96-102.
- [15] 肖辉杰,魏自刚,王庆,等.北京山区小流域生态经济效益评价:以雁栖河小流域为例[J].应用生态学报,2012,23(12):3479-3487.
Xiao Huijie, Wei Zigang, Wang Qing, et al. Evaluation on the eco-economic benefits of small watershed in Beijing mountainous area: A case of Yanqi River watershed [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(12):3479-3487.
- [16] 王继军,郑科,郑世清,等.中尺度生态农业建设效益评价指标体系研究[J].水土保持研究,2000,7(3):243-247.
Wang Jijun, Zheng Ke, Zheng Shiqing, et al. The index system of reviewing effects of ecological agriculture construction in the medium scale areas [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2000,7(3):243-247.
- [17] 王晓光.发展循环经济的基本途径与对策研究[J].软科学,2003,17(1):31-33.
Wang Xiaoguang. The essential ways and countermeasures for developing circulation economy [J]. Soft Science, 2003,17(1):31-33.
- [18] 杨世琦,高旺盛,隋鹏,等.湖南资阳区生态经济社会系统协调度评价研究[J].中国人口·资源与环境,2005,15(5):67-70.
Yang Shiqi, Gao Wangsheng, Sui Peng, et al. Evaluation of the harmony degree of Ziyang district's ecologic-economic-social system [J]. China Population, Resources and Environment, 2005,15(5):67-70.
- [19] 胡元林.高原湖泊流域可持续发展理论及评价模型研究[D].云南昆明:昆明理工大学,2010.
Hu Yuanlin. Research on the theory and evaluation model of sustainable development of plateau lake basin [D]. Kunming, Yunnan: Kunming University of Science and Technology, 2010.

- Li Jian. Monitoring technology and application of geological hazards in mountainous railway areas [J]. Railway Engineering, 2024,64(5):140-146.
- [11] Liu K F, Li H C, Hsu Y C. Debris flow hazard assessment with numerical simulation [J]. Natural Hazards, 2009, 49(1):137-161.
- [12] 刘科,李云鹏,郇亚军,等.成昆铁路 K295 泥石流灾害特征分析及治理对策研究[J].隧道建设(中英文), 2023,43(7):1246-1256.
- Liu Ke, Li Yunpeng, Li Yajun, et al. Characteristics analysis of debris flow disaster in K295 of Chengdu-Kunming railway and its control countermeasures [J]. Tunnel Construction, 2023,43(7):1246-1256.
- [13] 姚令侃.铁路泥石流工程灾害形式及概率分析[J].路基工程,1996(2):38-43.
- Yao Lingkan. Disaster forms and probability analysis of railway debris flow engineering [J]. Subgrade Engineering, 1996(2):38-43.
- [14] 崔鹏,邹强.山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法[J].地理科学进展,2016,35(2):137-147.
- Cui Peng, Zou Qiang. Theory and method of risk assessment and risk management of debris flows and flash floods [J]. Progress in Geography, 2016,35(2):137-147.
- [15] 杨昶,铁永波,张宪政,等.我国泥石流数值模拟研究历程及发展趋势[J].水土保持学报,2023,37(5):1-11.
- Yang Chang, Tie Yongbo, Zhang Xianzheng, et al. Research history and development trend of numerical simulation of debris flow in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(5):1-11.
- [16] 周公旦,崔鹏,吴宏伟,等.山地灾害大尺度动力学模拟实验平台[J].中国科学院院刊,2024,39(8):1458-1467.
- Zhou Gongdan, Cui Peng, Wu Hongwei, et al. Large-scale experimental platform for dynamic simulation of mountain hazards (LEADS) [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024,39(8):1458-1467.
- [17] 铁道部第三勘测设计院.铁路工程设计技术手册:桥渡水文[M].北京:中国铁道出版社,1993.
- Ministry of Railways No.3 Survey and Design Institute. Technical Manual for Railway Engineering Design: Bridge Crossing Hydrology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1993.

(上接第 123 页)

- [20] 杨进怀,吴敬东,祁生林,等.北京市生态清洁小流域建设技术措施研究[J].中国水土保持科学,2007,5(4):18-21.
- Yang Jinhuai, Wu Jingdong, Qi Shenglin, et al. Technical practices for building clean small watershed in Beijing [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007,5(4):18-21.
- [21] 郭娜.北京市山区小流域生态清洁程度影响因素分析[D].北京:北京林业大学,2016.
- Guo Na. Analysis of influencing factors of ecological cleanliness in small watersheds in mountainous areas of Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [22] 孙艳红.延庆县小流域综合治理模式及效益评价研究[D].北京:北京林业大学,2011.
- Sun Yanghong. The research on comprehensive management model and benefits evaluation of small watershed in Yanqing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [23] 陈凤,潘政,翟亚明,等.不同坡度下侵蚀性降水对土壤理化性质的影响[J].中国水土保持,2024(3):55-60.
- Chen Feng, Pan Zheng, Zhai Yaming, et al. The effect of erosive precipitation on physical and chemical properties of soil in different slopes [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(3):55-60.