

西安市生产建设项目水土流失评价

王诗雨¹, 霍春平², 张青峰¹, 李莹莹¹

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西安市水利水土保持工作站, 陕西 西安 710018)

摘要: [目的] 探明西安市城市生产建设项目水土流失特征及不同水土保持措施效应, 进而为改善西安市水土流失环境、制定更加精确有效的政策及措施提供科学依据。[方法] 以西安市 2022 年 84 个生产建设项目为例, 构建包含水损失比、土壤侵蚀比和绿地比 3 个指标在内的城市生产建设项目水土流失评价体系, 采用 TOPSIS 法对不同项目水土流失风险进行评估。[结果] ① 城市生产建设项目的地表变化主要以农村宅基地、草地、空闲地和耕地向建设用地转变, 其中, 以农村宅基地的转出为主, 约占总转变面积的 70%。② 83% 的生产建设项目绿地比有所增加; 61% 的生产建设项目径流损失呈现减少趋势并表现为: 新建房地产 < 商业服务 < 教育医疗 < 市政设施 < 城中村改造项目; 54% 的生产建设项目土壤侵蚀风险降低, 并在耕地、草地、空闲地中新建项目减轻土壤侵蚀的程度尤为突出, 而城中村改造会加剧区域土壤侵蚀程度; 所有项目的水损失量平均减少 $3.58 \times 10^4 \text{ m}^3$, 年土壤侵蚀量平均减少了 169.05 t。③ 西安市生产建设项目水土流失风险可划分为高、中等、较低、低 4 个等级。低和较低等级项目占总数的 69% 并以城中村改造类项目为主; 高风险等级项目均为占用草地项目。[结论] 西安市生产建设项目的水土流失防治效果显著, 但仍有较大提升空间, 未来应进一步加强项目水土流失风险管理。

关键词: 生产建设项目; 西安市; 水损失比; 土壤侵蚀比; 水土流失风险

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)05-0173-10

中图分类号: S157.1

文献参数: 王诗雨, 霍春平, 张青峰, 等. 西安市生产建设项目水土流失评价[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 173-182. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.019; Wang Shiyu, Huo Chunping, Zhang Qingfeng, et al. Evaluation of soil and water loss in urban production and construction projects in Xi'an City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 173-182.

Evaluation of Soil and Water Loss in Urban Production and Construction Projects in Xi'an City

Wang Shiyu¹, Huo Chunping², Zhang Qingfeng¹, Li Yingying¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. Xi'an Soil and Water Conservation Station, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of soil and water loss and the effects of different soil and water conservation measures in Xi'an urban production and construction projects were investigated to provide scientific basis for improving the soil and water loss environment in Xi'an City and formulating more accurate and effective policies and measures. [Methods] Eighty-four production and construction projects in Xi'an City in 2022 were used as case studies, and a soil erosion evaluation system, which included three indicators such as water loss ratio, soil erosion ratio, and green space ratio, was constructed. The TOPSIS method was used to assess the water and soil loss risks associated with each project. [Results] ① The surface changes mainly shifted from rural homesteads, grasslands, idle land, and cultivated land to construction land. Among these changes, the conversion of rural homesteads constituted the primary form, accounting for approximately 70% of the total transfer area. ② Green space ratio increased in 83% of urban production and construction projects. Among the production and construction projects, there was a decreasing trend in the runoff losses observed in 61% of the cases in the order as follows: new real estate < commercial services < education and

收稿日期: 2024-02-21

修回日期: 2024-06-16

资助项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“陕北黄土高原侵蚀分形特征”(2021JZ-17)

第一作者: 王诗雨(1997—), 女(汉族), 陕西省商洛市人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源与水土保持。Email: 18392587730@163.com。

通信作者: 张青峰(1974—), 男(汉族), 山西省孝义市人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。Email: zhqf@nwafu.edu.cn。

medical care < municipal facilities < urban village renovation projects. Approximately 54% of the production and construction projects successfully reduced soil erosion risks, with significant reductions observed in new real estate projects on cultivated land, grasslands, and idle land. But urban village renovation projects can increase regional soil erosion levels. The average reduction in water loss in all the projects was $3.58 \times 10^4 \text{ m}^3$, and the average annual soil erosion decreased by 169.05 tons. ③ The risk of soil erosion in production and construction projects in Xi'an City were classified into four levels: high, medium, low, and very low. The projects classified as low and very low levels accounted for 69% of the total, with a particular focus on urban village renovation projects. All the projects involved in the occupation of grassland were classified as high risk. [Conclusion] Production and construction projects in Xi'an City have shown significant effectiveness in preventing soil and water erosion; however, they need to be improved further. In the future, it will be necessary to further strengthen the management of soil and water erosion risks in these projects.

Keywords: production and construction projects; Xi'an City; water loss ratio; soil erosion ratio; soil and water loss risk

水土流失又称为水土损失,一方面指土壤及其母质、岩石在水力、风力及重力作用下发生的侵蚀、搬运及堆积过程^[1],另一方面,它还包括地表径流、渗漏及蒸发导致的水损失^[2]。城市化快速发展的背景下,由城市及其周边地区的生产建设项目引起的水土流失问题备受关注^[3]。

全面了解生产建设项目水土流失机理是做好城市水土保持工作的前提,许多学者积极探索了采矿^[4]、公路^[5-6]、输变电工程等^[7]不同类型生产建设项目的水土流失特征,对于堆土区^[8]、施工便道等^[9]工程建设期的临时下垫面,构建了数学或经验模型模拟土壤侵蚀过程^[10],目前以 USLE 和 RUSLE 模型为基础框架的土壤侵蚀预测方法在工程建设区中应用广泛^[11]。然而鲜少有针对主城区生产建设项目建成期水土流失的研究,同时 RUSLE 模型应用于面积相对较小的城市生产建设项目是否可行,缺少相关研究。为了更准确地评价生产建设项目水土流失程度和治理效果,选择适当的评价指标和因素至关重要,徐有鹏等^[12]基于侵蚀原因选取了植被覆盖率、斜坡高差、平台面积等因素作为水土流失强度评判标准;于坤霞^[13]从调水、保土、空气质量等方面构建评价体系,分析线性生产建设项目水土保持生态效益;对于城市建筑工地水土流失评价,Tang Hongliang 等^[14]建立了包含自然条件、建筑活动、保护和管理措施等方面指标在内的评价模型。这些评价因素虽然较为全面,但一些自然因素如“降雨、地形”等因子在水土保持规范制定时难以作为标准量化应用。

尽管对于单一建设项目水土流失评价研究已取得一定进展,但尚未充分揭示不同类型项目之间水土流失特征差异,从而无法明确揭示各类项目面临的具体问题,这为实际生产中有效指导水土保持方案编制带来局限和不确定性。为此,本文选取 2022 年度西

安市 84 个不同类型生产建设项目为研究对象,系统计算各项目建设完工后水损失、土壤侵蚀及绿地变化幅度作为水土流失评价指标,进而探究不同项目和水保措施对水土流失的影响,研究结果对于深入认识城市生产建设项目水土流失评价及防治具有重要意义,可以为生产建设项目水土保持方案编制、制定水土保持标准提供科学依据和有益补充。

1 研究区概况

西安市地处陕西省关中平原中部,东经 $107^{\circ}40' - 109^{\circ}49'$,北纬 $33^{\circ}4' - 34^{\circ}44'$,辖 11 区 2 县,面积 $1.08 \times 10^4 \text{ km}^2$,属于暖温带半湿润季风气候,年均温 13.3°C ,年降水量 $522.4 \sim 719.5 \text{ mm}$ 且分布不均匀。土壤类型在南部秦岭山地附近多为黄棕壤和棕壤,在北部渭河平原以黄褐土、褐土为主。西安市水土流失以水力侵蚀为主,多为微度侵蚀区,少数为轻度侵蚀区。

西安市 2022 年建设完成并按照《城市生产建设项目水土保持技术规范(DB6101/T3094—2020)》^[15]编制的生产建设项目共 84 个,囊括了城中村改造、市政设施、教育医疗、商业服务和新建房地产 5 种类型,见图 1。

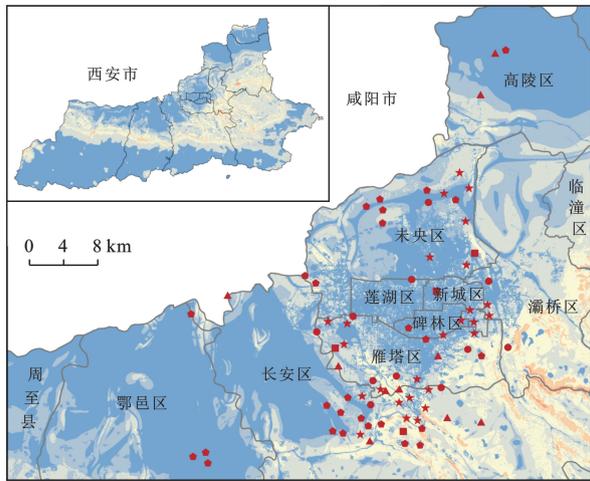
数据来源包括西安市 30 m 数字高程模型,各项目《水土保持方案书》《水土保持监测总结报告》《水土保持设施验收报告》以及实地考察。

2 研究方法

2.1 指标测算

姜楠等^[16]以水损失增加比、土壤侵蚀增加比作为评价新建房地产项目影响水土流失程度的指标,其分别代表项目建设前后水损失量、土壤侵蚀量增加

率,但该定义未考虑到水损失量、土壤侵蚀量会呈现正负双向变化趋势。因此,本文将此称为水损失比和土壤侵蚀比,以综合衡量生产建设项目对区域水资源的影响。



生产建设项目类型
 ● 新建房地产 ■ 市政设施 ▲ 商业服务 ◆ 教育医疗 ★ 城中村改造
 土壤侵蚀强度分级
 微度 轻度 中度 强度 极强度 剧烈

图 1 西安市生产建设项目分布

Fig.1 Spatial distribution of production and construction projects in Xi'an City

2.1.1 水损失比 水损失比为项目建设前后年水损失变化量与建设前年水损失量的比值,结果为正表示生产建设项目建成后水损失加重,结果为负则反之。采用径流系数法^[2]计算年水损失变化量。由于不同地形地貌和下垫面条件下产汇流情况各异,因此以项目建成后的实际地表覆盖状况为依据来划分预测单元,同一项目各预测单元建设前地表径流系数相同。计算公式如下:

$$m = \frac{W_{\Delta}}{W_0} \tag{1}$$

$$W_0 = \sum_{i=1}^n [F_i H \alpha_{0i} \times 10^{-3}] \tag{2}$$

$$W_{\Delta} = \sum_{i=1}^n [F_i H (\alpha_i - \alpha_{0i}) \times 10^{-3}] \tag{3}$$

式中: m 为项目综合水损失比(无量纲); W_0 为项目建设前年水损失量(m^3); W_{Δ} 为项目建设前后年水损失变化量(m^3); F_i 为第 i 个分区的面积(m^2); H 为项目所在地的平均年降水量(mm); α_{0i} 为第 i 个分区建设前地表径流系数; α_i 为第 i 个分区建成后地表径流系数。

统计目前所收集的 84 个生产建设项目建设前土地利用类型及实际地表覆盖状况,项目建设前土地利用类型共 4 种:一般耕地、农村宅基地、草地、空闲地,其径流系数取值参考《水土保持工程设计规范(GB51018-2014)》^[17],分别为 0.4,0.85,0.4,0.5。项目建成后,按照实际地表覆盖状况共划分 6 种分区:屋面、硬化、植草砖铺装、透水砖铺装、一般绿地及下凹式绿地,其径流系数参照《建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范》^[18] 和项目《水土保持方案报告书》中各地表类型径流系数的实际取值。

2.1.2 土壤侵蚀比 土壤侵蚀比为项目建设前后年土壤侵蚀变化量与建设前年土壤侵蚀量的比值。年土壤侵蚀变化量是项目建成后预测单元年土壤侵蚀量与原土地类型下年土壤侵蚀量之差,参考新增水土流失量^[19]计算方法。计算公式如下:

$$n = \frac{S_{\Delta}}{S_0} \tag{4}$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n F_i M_{0i} \tag{5}$$

$$S_{\Delta} = \sum_{i=1}^n [F_i (M_i - M_{0i})] \tag{6}$$

式中: n 为项目综合土壤侵蚀比,无量纲; S_0 为项目建设前地表年土壤侵蚀量(t); S_{Δ} 为项目建设前后年土壤侵蚀变化量(t); M_{0i} 为第 i 个分区建设前地表土壤侵蚀模数 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; M_i 为第 i 个分区建成后土壤侵蚀模数 [$t/(hm^2 \cdot a)$]。采用 RUSLE 模型^[20]并结合原始矢量地块均值法^[21]计算每个生产建设项目不同分区的土壤侵蚀模数。其中,植被与覆盖因子 C 和水土保持因子 P 参考刘刚等^[22]以西安市土地利用类型为依据对不同地类及覆盖度的赋值方法(表 1)。

表 1 不同用地类型及地表的 C, P 因子赋值

Table 1 C, P factor assignment of different land use types and surface

因子	耕地	其他草地	农村宅基地	空闲地	房屋及硬化	透水砖铺装	植草砖铺装	下凹式绿地	一般绿化
C	0.230	0.240	0.001	0.001	0.001	0.001	0.450	0.040	0.040
P	1.000	0.750	0.100	1.000	0.100	0.100	0.500	0.750	0.750

2.1.3 绿地比 本文将项目建设前后林草植被覆盖面积变化量与建设前林草植被覆盖面积的比值定义

为绿地比,以评估绿地变化情况及生产建设项目对城市绿地的影响,参考生态系统类型面积变化率计算方

法^[23], 计算公式为:

$$o = \frac{A_i - A_{oi}}{A_{oi}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: o 为项目绿地比(%); A_i 为项目建设完成后林草植被覆盖面积(hm^2); A_{oi} 为项目建设前该区域林草植被覆盖面积(hm^2)。

2.2 水土流失综合评价

TOPSIS 模型又称距离综合评价法, 用于在有限方案里实现多目标决策分析。该模型适用于定量指标评价, 以被评价对象各个指标与理想解和负理想解的相对距离为依据进行排序, 从而比较多个方案的优劣性^[24]。本文平均分配各生产建设项目综合水损失比、综合土壤侵蚀比和绿地比 3 个指标的权重, 运用 TOPSIS 评价模型, 计算各项目与最优方案的贴进度 S_i 。 S_i 取值范围为 $[0, 1]$, 值越大表明该项目建成后水土流失风险越低。结合相关研究成果^[25-26], 将 S_i 划分为 4 个等级, 作为评价生产建设项目水土流失风险的依据 (见表 2)。

表 2 西安市生产建设项目水土流失风险评价标准

Table 2 Soil and water loss risk assessment standard of production and construction projects in Xi'an City

贴进度	水土流失风险等级
$0 < S_i \leq 0.4$	高风险
$0.4 < S_i \leq 0.7$	中等风险
$0.7 < S_i \leq 0.8$	低风险
$0.8 < S_i \leq 1$	极低风险

2.3 数据处理

利用 SPSS 26.0 对各项目绿地比、综合水损失比、综合土壤侵蚀比和综合评分进行描述性统计分析、方差分析和相关性分析, 利用 ArcGIS 10.8 和 Origin 2021 软件制图。

3 结果与分析

3.1 项目建设前后土地利用及水土流失变化

西安市 84 个建设项目占地面积共 $1\,407.88 \text{ hm}^2$ 。由图 2 可知, 农村宅基地是项目建设前的主要地类类型, 面积比例为 70%; 耕地是第二大地类类型, 面积比例为 18%。建设前面积最少的地类是草地, 面积比例仅为 3%。这表明近年西安市严格执行建设用地标准, 在新建生产建设项目时优先使用存量建设用地, 提高建设用地使用效率, 同时, 由于农村宅基地分布一般为集中连片, 周边更是具有完备的供水、电力等基础设施, 这些资源可用性可降低建设成本。84 个项目建设完成后面积最多的分区为一般绿化, 面积

比例为 47%, 其次为屋面和硬化, 二者面积比例均为 16%。建设后面积最少的分区为植草砖铺装, 为 15.18 hm^2 , 面积比例仅为 1%, 表明目前生产建设项目中植草砖铺装的应用并不广泛。一般绿化区的主要来源是农村宅基地和耕地, 其中农村宅基地转化最多, 为 563.49 hm^2 , 占一般绿化面积的 85%。

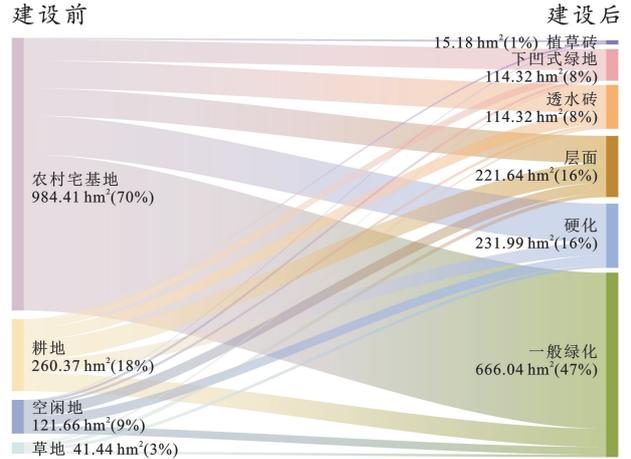


图 2 西安市项目建设前后地表类型流向

Fig.2 Surface type flow diagrams before and after project construction in Xi'an City

生产建设项目水土流失量较建设前明显减少 (表 3), 建成后年水损失量减少 $3.01 \times 10^6 \text{ m}^3$, 年土壤侵蚀量减少 $1.42 \times 10^4 \text{ t}$, 表明西安市生产建设项目的水土流失防治具有显著成效。

表 3 西安市生产建设项目不同分区年水损失及土壤侵蚀变化量
Table 3 Annual water loss and soil erosion variation in different zones of production and construction projects in Xi'an City

分区	年水损失变化量/ 10^4 m^3	年土壤侵蚀变化量/ 10^4 t
屋面	22.45	-0.54
硬化	11.26	-0.43
植草砖	-3.22	-0.02
透水砖	-38.17	-0.14
一般绿化	-252.66	-0.19
下凹式绿地	-40.44	-0.10
总计	-300.78	-1.42

从水损失变化量来看, 一般绿化是减少水损失的主要分区, 贡献率高达 84%; 下凹式绿地较其他分区的水损失减少量也比较多, 贡献率为 13.45%, 其次是透水砖铺装, 占水损失减少量的 12.69%; 植草砖铺装产生的水损失减少量最小, 贡献率仅有 0.96%。从土壤侵蚀变化量上看, 屋面和硬化分区显著降低了土壤侵蚀的发生频率, 这些区域的年土壤侵蚀减少量分别占总减少量的 38.46% 和 30.06%; 紧随其后的是一般绿化, 贡献率为 13.25%; 来自下凹式绿地、透水砖铺

装、植草砖铺装减少的土壤侵蚀量较少,分别占土壤侵蚀总减少量的 7.05%,9.84%和 1.34%。屋面和硬化分区的水损失变化量呈增加而土壤侵蚀变化量呈减少态势,说明这两个分区会加剧径流但能有效减少土壤损失,这是由于硬化和屋面汇流能力强、滞蓄能力弱,但不含土壤层。

3.2 分项指标统计特征

3.2.1 绿地比特征 西安市生产建设项目建设前后水土流失量的减少与整体绿地面积增多有较大关系。由图 3 可知,西安市生产建设项目绿地比整体呈增加趋势。83%的项目绿地比大于 0,表明其绿地面积有所增加,说明生产建设项目可有效增添城市绿色空

间。绿地面积增加的项目中,有 55.7%的项目是由原本农村宅基地改建而来,这些项目充分利用了农村宅基地宅前屋后的空闲地和荒草地,化零为整以实现城市绿地的扩展。反之 17%的项目绿地面积有所减少,原因是建设前地表就为植被覆盖度较高的草地。所有项目绿地比均值为 35.42%,大于《城市生产建设项目水土保持技术规范》规定的林草植被覆盖率目标值(房地产建设、市政工程、公共服务设施项目分别为 28%,25%,28%),符合城市生产建设项目水土保持要求。绿地比介于 20%~40%之间的项目数量最多(共 43 个),占总数的 51%,这表明实际生产中在该比例范围内规划和设计绿化用地更为普遍。

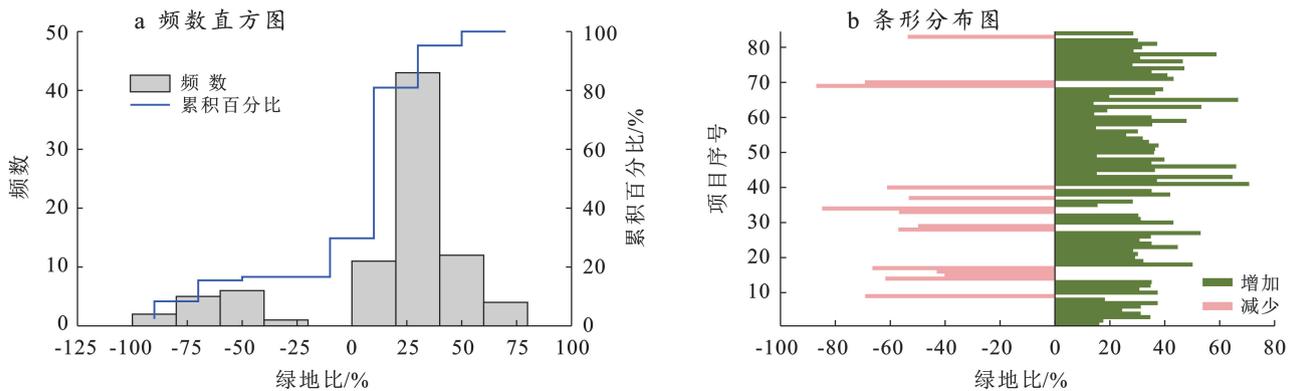


图 3 西安市生产建设项目绿地比特征

Fig.3 Green space ratios in production and construction projects in Xi'an City

3.2.2 水损失比特征 项目水损失比分布在 -0.76~0.70 之间,其中 61%的项目水损失比为负值,表明其径流流失较建设前明显减轻。原地表为农村宅基地和空闲地的项目综合水损失比均值分别为 -0.47 和 -0.05(图 4a),显著低于占用耕地和草地项目(均值分别为 0.16,0.19)。整体来看,4 种原地表项目综合水损失比表现为农村宅基地<空闲地<耕地<草

地的规律。不同类型项目综合水损失比均值大小顺序为:城中村改造<新建房地产<市政设施<教育医疗<商业服务(图 4b)。其中城中村改造类均值最小(-0.32),原因是该类型项目在硬化较多的宅基地区域增加水土保持措施,能有效拦截地表径流;商业服务类项目均值最大(0.18),原因可能是该类项目用途单一,硬化和屋面比例较大,导致水损失比较高。

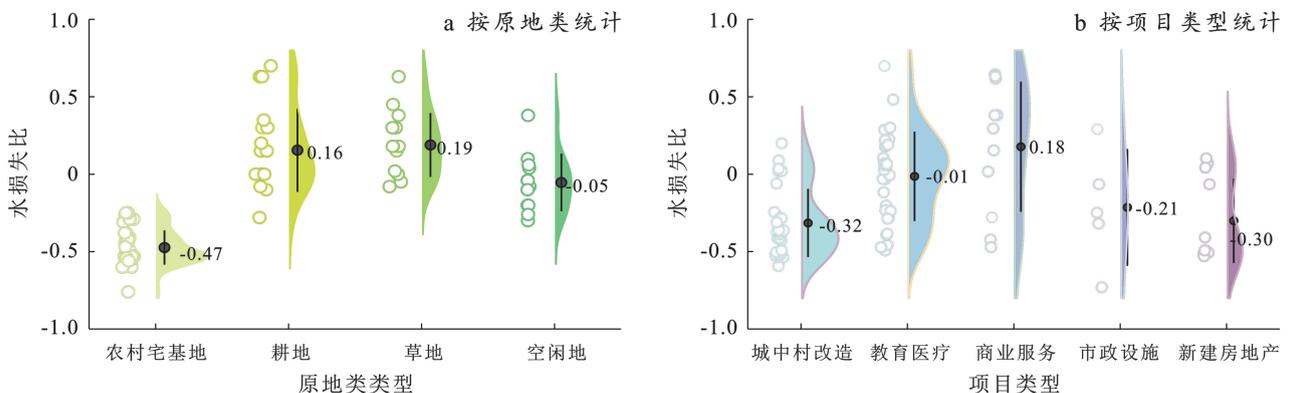
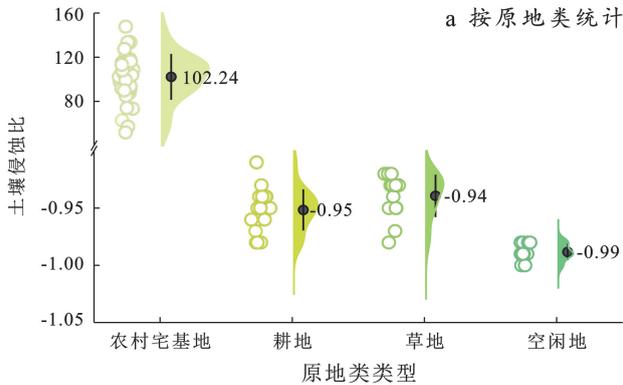


图 4 西安市生产建设项目水损失比特征

Fig.4 Water loss ratios in production and construction projects in Xi'an City

3.2.3 土壤侵蚀比特征 西安市生产建设项目土壤侵蚀比数值变幅较大,其中 46% 的项目综合土壤侵蚀比大于 0,介于 51.79~147.69,由此可见生产建设项目的土壤侵蚀风险普遍较高。

由图 5a 可知,基于农村宅基地改造的建设项目土壤侵蚀比平均值为 102.24,远远大于其他 3 类,这是由于新建项目包含下凹式绿地、一般绿化等存在水力侵蚀风险的地表。原地类为空闲地的项目土壤侵



蚀比均值最小(-0.99),土壤侵蚀风险最低。由图 5b 可见,不同类型项目中新建房地产类土壤侵蚀比均值最大(111.48),其次是城中村改造类,表明这两种类型项目建成后对区域土壤侵蚀影响较大;商业服务类项目土壤侵蚀比均值最小(-0.97)。综合来看,西安市生产建设项目土壤侵蚀风险一方面来源于占用农村宅基地的透水地表扩建,另一方面来源于住宅类项目。

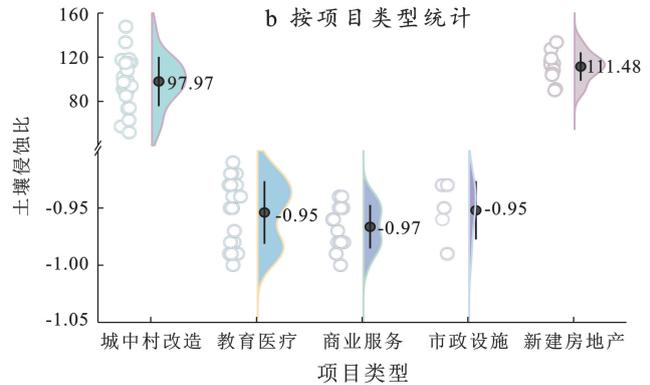


图 5 西安市生产建设项目土壤侵蚀比特征

Fig.5 Soil erosion ratios in production and construction projects in Xi'an City

3.3 生产建设项目水土流失综合评价

采用 TOPSIS 模型评价项目的水损失比、土壤侵蚀比和绿地比,得到水土流失综合评价得分,并划分为高、中等、较低和低 4 个风险等级(图 6)。西安市生产建设项目综合评价得分介于 0.23~0.88 之间,平均值为 0.67;低和较低风险等级项目比例为 69%,高、中等风险等级相对较少。较低风险等级项目最多,占总数的 58%;低风险项目最少,仅占总数的 18%。整体而言,西安市生产建设项目水土流失风险处于中等水平,需进一步提升生产建设项目水土流失防控能力。

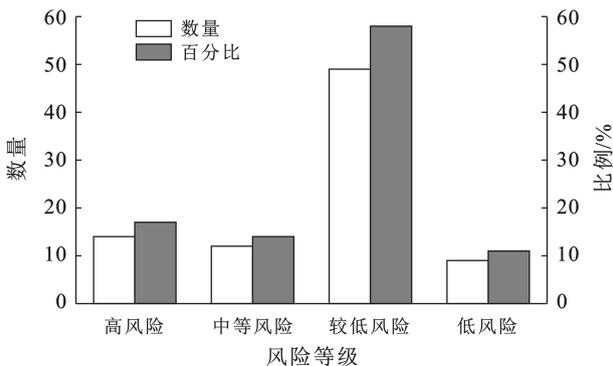


图 6 生产建设项目水土流失风险等级数量及占比情况

Fig.6 Quantities and proportions of soil and water loss risk levels in production and construction projects

无论是综合评价得分均值还是低和较低风险等级项目比例,占用农村宅基地的项目均为最大(图 7a),其

综合评价得分介于 0.67~0.84,均值为 0.75,处于低和较低等级的项目比例为 90%,表明占用农村宅基地项目在控制区域水土流失上表现较好;建设前为草地的项目综合评分普遍较低(均值为 0.32),分布在 0.23~0.39,集中在高风险等级,这说明占用草地进行项目开发建设会提高区域水土流失风险。

由图 7b 可知,不同用途项目中,低和较低风险等级的比例从高到低依次为:城中村改造>新建房地产>市政设施>教育医疗>商业服务。城中村改造类项目中,低和较低风险等级项目比例高达 85%;82% 的新建房地产类项目综合评价得分大于 0.7,低和较低风险等级比例略小于城中村改造类;商业服务类项目水土流失风险普遍较高,高和中等风险等级比例高达 55%,由此可见,对西安市生产建设项目水土流失风险控制亟需注意该类项目的监管和督导。

4 讨论

4.1 生产建设项目水土流失评价适用性

本文选取水损失比、土壤侵蚀比、绿地比 3 个指标定量分析生产建设项目建设前后水土流失变化情况,具有客观、快速的特点。该方法计算土壤侵蚀变化时考虑了不含裸露土壤的区域,如屋面、硬化和透水砖铺装,以更准确反映地类变化对土壤侵蚀的影响。采用修正的土壤流失方程计算生产建设项目建成后平均土壤侵蚀模数为 68.47 t/(km²·a),结果与

西安市碑林区、未央区、新城区和雁塔区年均土壤侵蚀模数相近^[22]。但 RUSLE 只是一个经验模型,生产

建设项目下垫面的复杂性给预测带来困难^[6],如何进一步提高预测准确性还需要作深入分析。

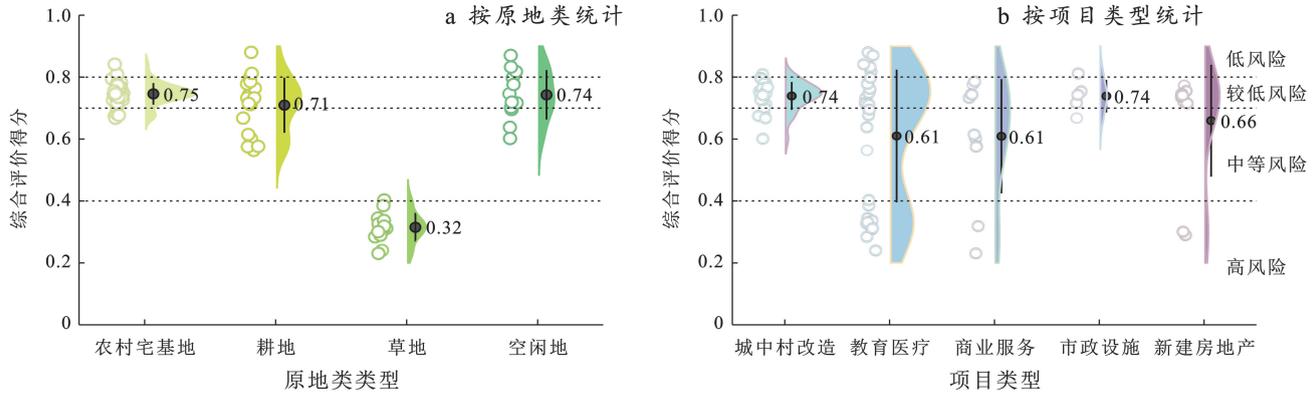


图 7 西安市生产建设项目综合评价得分

Fig.7 Comprehensive evaluation scores in production and construction projects in Xi'an City

4.2 不同分区的水损失比和土壤侵蚀比差异

从土壤侵蚀比均值来看(图 8a),占用农村宅基地项目建成后下凹式绿地、一般绿化及植草砖铺装的平均土壤侵蚀比分别是 289.23,275.60 和 187.95,远大于其他几种原地类的建成分区。建前农村宅基地的硬化和屋面转变为下凹式绿地、一般绿化和植草砖铺装,降雨和径流会导致覆盖的新土层产生土壤侵蚀;但由宅基地改建的硬化、屋面和透水砖铺装不会对土壤侵蚀产生影响。原地类为耕地、草地、空闲地的项目,建成后 6 种分区的土壤侵蚀比均值都小于 0,不同占地类型项目中各分区土壤侵蚀比最小的依次为:

硬化(耕地)、透水砖铺装(草地)、屋面(空闲地),在北京市房地产水土流失评价中也得出一致的结论^[16]。

不同分区平均水损失比特征如图 8b 所示,除了占地类型为农村宅基地的项目外,其他 3 类项目的屋面和硬化分区平均水损失比均大于 0,表明屋面和硬化地表扩张会明显加重区域的径流损失,前人研究结果显示,硬化地表占比较大的建设用地面积大幅度增加会导致径流量增大^[27]。原地类为耕地的项目中,屋面和硬化分区的水损失比均值分别为 1.0,0.98,在 4 类项目中属最高水平,说明从耕地到屋面和硬化的转变方式对径流增加影响最大。

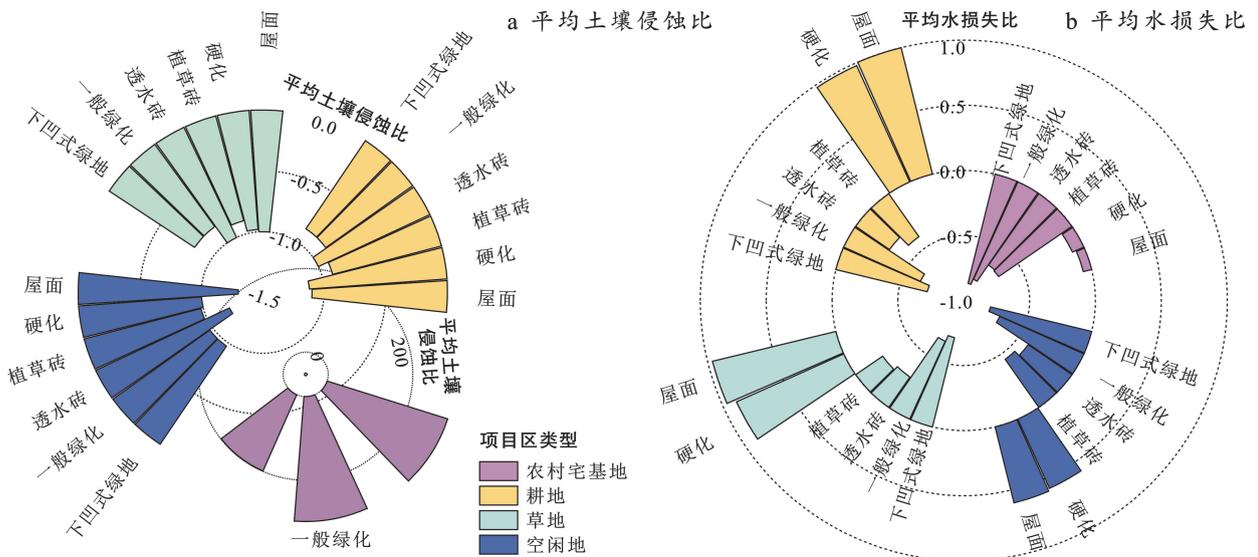


图 8 西安市不同生产建设项目分区平均水损失比和平均土壤侵蚀比特征

Fig.8 Characteristics of average water loss ratios and average soil erosion ratios in different zones of production and construction projects in Xi'an City

下凹式绿地的水损失比均值在占用农村宅基地、耕地、草地和空闲地项目中都为最小,分别是 -0.87,

-0.7, -0.79 和 -0.71,这表明房地产项目中增加下凹式绿地能有效促进径流调控,提高地表下渗和雨洪

拦蓄能力^[28]。相比之下,一般绿化对水损失削弱作用较小,但有研究发现居民区绿地覆盖增加 10% 可减少地表径流 4.9%^[29],该结论说明一般绿化仍是建设项目控制地表径流量的有效措施。植草砖铺装和透水砖铺装的平均水损失比大致在 -0.68~-0.25,这两种分区都能有效减少项目区域的径流损失,但减小程度小于下凹式绿地和一般绿化。

综上所述,植草砖铺装、透水砖铺装、下凹式绿地和一般绿化 4 种水土保持措施分区对项目建成后径流调控具有明显作用,但其是否能够防治土壤侵蚀还需进一步商榷。

4.3 评价结果影响因素分析

为探究西安市生产建设项目水损失比、土壤侵蚀比和综合评价得分的影响因素,采用皮尔逊相关分析法筛选出 4 个关键因子:透水地表比例、平均土壤侵蚀模数、综合径流系数和植物措施投资(图 9)。

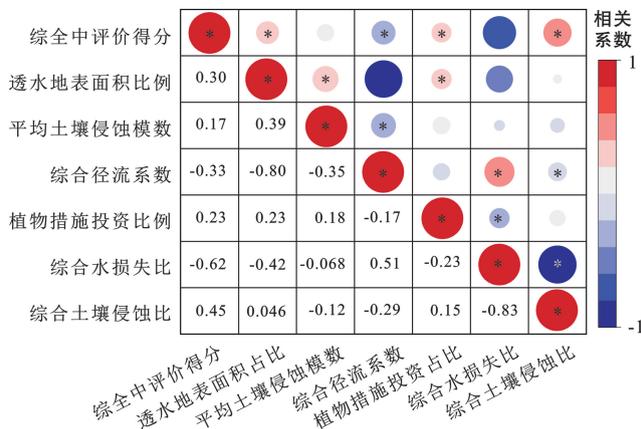
透水地表面积占比是指项目区透水砖铺装、植草砖铺装、下凹式绿地和一般绿化总面积与项目总面积的比值,其影响综合水损失比的方向为负,影响综合评价得分的方向为正。前人研究显示,城市内部草地、林地和海绵措施等透水地表对缓解不透水地表的径流效应具有积极作用^[30],透水地表面积比例大于 80% 时可保证地区水资源平衡^[31]。这些透水地表同样影响建设项目水资源平衡,故而透水地表面积增大可降低水损失比,同时增加绿化面积,提高综合评价得分。

植物措施投资比例与综合评价得分呈正相关。植物措施投资比例越高,项目建成后环境越舒适,缓解水土流失的潜力越大。此外,植物措施投资比例与综合水损失比呈负相关关系,但与土壤侵蚀比之间没有显著相关性。

综合径流系数由项目区域径流量、分区面积和分区数量等因素共同决定,该系数与水损失比呈正相关,与土壤侵蚀比和综合评价得分呈负相关。相关研究表明,径流系数能反映下垫面状况:同一降雨强度下不透水下垫面径流系数大于透水下垫面^[32],即较高的径流系数代表项目区域硬化地表比例较大。随着径流系数增加,地表径流量相应增加,水损失比增大,综合评价得分随之降低;反之高径流系数的地表排水能力较强,能减少水流对土壤的侵蚀。

平均土壤侵蚀模数与水损失比、土壤侵蚀比和综合评价得分之间关联性较弱,这是因为平均土壤侵蚀模数只反映项目建成状态,而未体现降雨、坡度、土壤条件和植被覆盖等因素对建设前后水土流失变化的影响。透水地表比例、综合径流系数与平均土壤侵蚀

模数相关性分别为 0.39 和 -0.35,北京市典型生产建设项目研究^[33]结果表明项目建成区侵蚀模数与植被盖度和不透水面积关系密切,与本研究结果一致。



注: * 表示在 0.05 水平上显著相关,圆圈面积表示相关系数大小。

图 9 西安市生产建设项目评价结果影响因素分析

Fig.9 Analysis of influencing factors of evaluation results of production and construction projects in Xi'an City

5 结论

本文以西安市 84 个生产建设项目为例,计算项目绿地比、水损失比和土壤侵蚀比 3 个指标,经统计分析和综合评价得出以下结论:

(1) 西安市生产建设项目水土流失风险处于中等水平,较低风险等级的项目最多,其数量占比达到 58%,但低风险等级项目总量并未占据绝对优势,水土流失风险管控仍有较大提升空间。占用草地和以商业服务为主要用途的项目水土流失风险普遍较高,针对这两类生产建设项目需进一步优化设计水土保持措施,提高水土流失防控能力。

(2) 生产建设项目的绿地比、水损失比和土壤侵蚀比能准确评价生产建设项目水土流失防治成效,为生产建设项目水土流失评价指标提供有益补充。从 3 个指标统计分析结果可知,西安市生产建设项目可有效增加城市绿色空间,且绿地比均值符合城市生产建设项目水土保持要求。高水损失比主要集中在占用耕地和草地以及用途为商业服务的项目上,高土壤侵蚀比主要集中在占用农村宅基地的项目和以城中村改造、新建房地产为主要用途的项目中。

(3) 植草砖铺装、透水砖铺装、下凹式绿地和一般绿化 4 种水土保持措施分区在径流调控上具有显著效果,其中下凹式绿地缓解径流损失的作用更明显,但这 4 种分区的土壤侵蚀防治效果相对较弱,未能明显改善土壤侵蚀问题。整体来看,西安市生产建设项目的水土流失防治具有显著成效,项目建成后水

损失量和土壤侵蚀量都较原来呈减少趋势。项目建设成后一般绿化区面积比例最大,其主要来源是农村宅基地的改建。

参考文献 (References)

- [1] 吴发启,王健.土壤侵蚀原理[M].3版.北京:中国林业出版社,2017:1-2.
Wu Faqi, Wang Jian. Principle of soil erosion [M]. 3rd version. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017:1-2.
- [2] 张鸿,马涛,张进朝,等.水土保持术语修订中“水流失”概念的界定[J].中国水土保持,2023(12):16-21.
Zhang Hong, Ma Tao, Zhang Jinzhao, et al. Definition of water loss in the revision of soil and water conservation terminology [J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(12):16-21.
- [3] 曾祥坤,王仰麟,李贵才.中国城市水土保持研究综述[J].地理科学进展,2010,29(5):586-592.
Zeng Xiangkun, Wang Yanglin, Li Guicai. Urban water and soil conservation research: Status, issues and trend [J]. Progress in Geography, 2010,29(5):586-592.
- [4] 徐启胜,王金满,时文婷.大型露天煤矿区景观格局变化对水土流失的影响:以山西平朔矿区为例[J].中国土地科学,2022,36(4):96-106.
Xu Qisheng, Wang Jinman, Shi Wenting. Influence of landscape pattern changes in large-scale open-pit coal mining area on soil erosion: A case study on pingshuo mining area in Shanxi Province [J]. China Land Science, 2022,36(4):96-106.
- [5] Yang Heping, Lin Liping, He Yingxi. Soil erosion caused by highway construction in expansive soils districts and its prevention measures [C]//Liu H, Deng A, Chu J. Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 781-789.
- [6] 张涛,金德钢,佟光臣,等.基于RUSLE的线状开发建设项目区土壤侵蚀动态监测:以浙江省宁波市北环快速路工程为例[J].水土保持通报,2016,36(5):131-135.
Zhang Tao, Jin Degang, Tong Guangchen, et al. Monitoring soil erosion in linear production and construction project areas based on RUSLE: A case study of north ring expressway in Ningbo City, Zhejiang province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 131-135.
- [7] 陈晓刚,丰佳,王文龙,等.黄土和红壤丘陵区输变电路工程水土流失影响因素及特征[J].水土保持研究,2022,29(4):192-197.
Chen Xiaogang, Feng Jia, Wang Wenlong, et al. Influencing factors and soil erosion characteristics for trans-
- mission line engineering in loess and red soil hilly region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):192-197.
- [8] 李建明,牛俊,王文龙,等.不同土质工程堆积体径流产沙差异[J].农业工程学报,2016,32(14):187-194.
Li Jianming, Niu Jun, Wang Wenlong, et al. Differences in characteristics of runoff and sediment yielding from engineering accumulations with different soil textures [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(14):187-194.
- [9] 于洋,姜群鸥,王紫璇,等.基于WEPP模型的工程建设中施工便道边坡水土流失特征:以林芝市巴宜区为例[J].水土保持学报,2023,37(5):31-39.
Yu Yang, Jiang Qunou, Wang Zixuan, et al. Soil and water loss characteristics of construction service road hillside in engineering construction based on WEPP model: Take bayi district, Nyingchi city as an example [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5):31-39.
- [10] Aksoy H, Kavvas M L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models [J]. Catena, 2005,64(2/3):247-271.
- [11] 王文龙,李建明,康宏亮,等.生产建设项目工程堆积体土壤侵蚀预测模型构建[J].水土保持学报,2023,37(3):27-34.
Wang Wenlong, Li Jianming, Kang Hongliang, et al. Soil erosion prediction model for spoil heaps in production and construction projects [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(3):27-34.
- [12] 许有鹏,都金康,张立峰,等.城市水土流失综合评估模型研究[J].水土保持通报,2000,20(4):16-19.
Xu Youpeng, Du Jinkang, Zhang Lifeng, et al. Comprehensive evaluation on urban soil and water loss models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000,20(4):16-19.
- [13] 于坤霞,白璐璐,李占斌,等.线性生产建设项目生态效益动态评价及其指标权重分析:以西安—商洛高速为例[J].中国水土保持科学,2018,16(4):115-123.
Yu Kunxia, Bai Lulu, Li Zhanbin, et al. Dynamic evaluation of ecological benefits and weight analysis of indexes for the linear production and construction project: A case study of national highway from Xi'an to Shangluo [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018,16(4):115-123.
- [14] Tang Hongliang, Shi Pengkun, Fu Xiaoli. An analysis of soil erosion on construction sites in megacities using analytic hierarchy process [J]. Sustainability, 2023,15(2):1325.
- [15] 西安市水务局,西安市水利水土保持总站,西安理工大

- 学.城市生产建设项目水土保持技术规范:DB6101/T3094—2020[S].陕西 西安:西安市市场监督管理局, 2021.
- Xi'an Water Affairs Bureau, Xi'an Water Resources and Soil Conservation Station, Xi'an University of Technology. Technical Specifications of Soil and Water Conservation for Urban Production and Construction Projects: DB6101/T3094—2020 [S]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an Market Supervision and Administration Bureau, 2021.
- [16] 姜楠,朱天平,赵继伟,等.城市房地产项目水土流失评价[J].建筑经济,2021,42(S1):308-311.
- Jiang Nan, Zhu Tianping, Zhao Jiwei, et al. Evaluation of soil erosion in urban real estate projects [J]. Construction Economy, 2021,42(S1):308-311.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.水土保持工程设计规范:GB51018—2014[S].北京:中国计划出版社,2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China. Code for Design of Soil and Water Conservation Engineering: GB51018—2014 [S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2015.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范:GB50400—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China. Technical Code for Rainwater Management and Utilization of Building and Sub-district: GB50400—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [19] 屈寒飞,张豫.华南地区某房地产建设项目水土流失规律分析[J].东北师大学报(自然科学版),2013,45(2):153-158.
- Qu Hanfei, Zhang Yu. Soil erosion analysis of a real estate construction project in South China [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2013,45(2):153-158.
- [20] 刘少佳,任志远,杨文艳,等.基于马尔科夫模型土壤侵蚀动态变化研究:以西安都市圈为例[J].水土保持研究,2015,22(5):14-19.
- Liu Shaojia, Ren Zhiyuan, Yang Wenyan, et al. Dynamic changes of soil erosion based on Markov model: A case study of the Xi'an metropolitan [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(5):14-19.
- [21] 李文龙,袁利,魏文杰,等.2种空间数据结构对县域尺度土壤侵蚀评价的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(6):74-82.
- Li Wenlong, Yuan Li, Wei Wenjie, et al. Effects of two spatial data structures on soil erosion assessment at county scale [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(6):74-82.
- [22] 刘刚,李鹏,张旭,等.西安市水土流失空间分布特征与管控空间划分[J].水土保持学报,2020,34(3):91-97.
- Liu Gang, Li Peng, Zhang Xu, et al. Spatial distribution characteristics of soil erosion and spatial division of management and control in Xi'an [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(3):91-97.
- [23] 中华人民共和国生态环境部.全国生态状况调查评估技术规范(生态系统格局评估):HJ1171—2021[S].北京:中国环境科学出版社,2021.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical Specification for National Ecological Status Survey and Assessment (Ecosystem Pattern Assessment): HJ1171—2021 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2021.
- [24] 祁菁.基于组合赋权 TOPSIS 模型的建设项目水土保持绩效评价及障碍因子诊断[J].水土保持研究,2023,30(6):458-467.
- Qi Jing. Performance evaluation of soil and water conservation and diagnosis of obstacle factors in construction projects based on combined weighting TOPSIS model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):458-467.
- [25] 雷勋平,Robin Qiu,刘勇.基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J].农业工程学报,2016,32(13):243-253.
- Lei Xunping, Qiu R, Liu Yong. Evaluation of regional land use performance based on entropy TOPSIS model and diagnosis of its obstacle factors [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(13):243-253.
- [26] 信桂新,杨朝现,杨庆媛,等.用熵权法和改进 TOPSIS 模型评价高标准基本农田建设后效应[J].农业工程学报,2017,33(1):238-249.
- Xin Guixin, Yang Chaoxian, Yang Qingyuan, et al. Post-evaluation of well-facilitated capital farmland construction based on entropy weight method and improved TOPSIS model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(1):238-249.
- [27] 马亚鑫,周维博,宋扬.西安市主城区土地利用变化及其对地表径流的影响[J].南水北调与水利科技,2016,14(5):49-54.
- Ma Yaxin, Zhou Weibo, Song Yang. Land use change and its impact on surface runoff in the main city of Xi'an [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016,14(5):49-54.

- 2017,38(4):54-66.
- Jin Juliang, Shen Shixing, Pan Zhengwei, et al. Advances in theoretical and applied research on set pair analysis method for water resources system [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017,38(4):54-66.
- [22] 焦士兴,陈林芳,王安周,等.河南省农业水资源脆弱性时空特征及障碍度诊断[J].农业现代化研究,2020,41(2):312-320.
- Jiao Shixing, Chen Linfang, Wang Anzhou, et al. The spatial-temporal patterns of vulnerability analysis and the obstacle diagnosis of agricultural water resource in Henan Province [J]. Research of Agricultural Modernization, 2020,41(2):312-320.
- [23] 石晓昕,袁重乐,钱会,等.基于 DPSIR-TOPSIS 模型的河北省水资源承载力评价及障碍因素研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(5):92-99.
- Shi Xiaoxin, Yuan Chongle, Qian Hui, et al. Evaluation and obstacle factors of water resources carrying capacity in Hebei Province based on DPSIR-TOPSIS model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021,32(5):92-99.
- [24] 肖静,袁江棋,罗响,等.基于博弈论和云模型的武汉市水资源承载力变化研究[J].武汉理工大学学报(社会科学版),2022,35(3):86-93.
- Xiao Jing, Yuan Jiangqi, Luo Xiang, et al. Change of water resource carrying capacity in Wuhan City based on game theory and cloud model [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Social Sciences Edition), 2022,35(3):86-93.
- [25] 周正柱,王俊龙.长江经济带生态环境压力、状态及响应耦合协调发展研究[J].科技管理研究,2019,39(17):234-240.
- Zhou Zhengzhu, Wang Junlong. Research on the coupling coordinated development of ecological environment pressure, state and response in Yangtze River economic belt [J]. Science and Technology Management Research, 2019,39(17):234-240.
- [26] 马冬梅,陈大春.基于熵权法的模糊集对分析模型在乌鲁木齐市水资源脆弱性评价中的应用[J].水电能源科学,2015,33(9):36-40.
- Ma Dongmei, Chen Dachun. Application of fuzzy set pair analysis model based on entropy weight in water resources vulnerability assessment of Urumqi [J]. Water Resources and Power, 2015,33(9):36-40.
- [27] 解刚,王向东.北京市房地产类建设项目下凹式绿地的雨水拦蓄能力及挖深研究[J].水土保持通报,2013,33(2):144-146.
- Xie Gang, Wang Xiangdong. Storage capacity and digging depth for rainwater collection on low elevation green land in projects of real estates in Beijing City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013,33(2):144-146.
- [28] Gill S E, Handley J F, Ennos A R, et al. Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure [J]. Built Environment, 2007,33(1):115-133.
- [29] 张永勇,侯进进,夏军,等.中国典型城市小区尺度下垫面对径流过程的调控特征与空间差异[J].中国科学:地球科学,2022,52(8):1427-1442.
- Zhang Yongyong, Hou Jinjin, Xia Jun, et al. Regulation characteristics of underlying surface on runoff regime metrics and their spatial differences in typical urban communities across China [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022,52(8):1427-1442.
- [30] Kauffman G J, Belden A C, Vonck K J, et al. Link between impervious cover and base flow in the white clay creek wild and scenic watershed in Delaware [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009,14(4):324-334.
- [31] 燕超,胡海波,徐晓梅,等.模拟降雨条件下城市下垫面径流系数变化规律[J].中国水土保持科学,2022,20(5):24-30.
- Yan Chao, Hu Haibo, Xu Xiaomei, et al. Changing pattern of runoff coefficients in urban underlying surfaces under simulated rainfall conditions [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(5):24-30.
- [32] 相莹敏,刘加刚,卜自珍,等.北京市典型生产建设项目土壤侵蚀规律研究[J].中国水土保持,2020(5):33-35.
- Xiang Yingmin, Liu Jiagang, Bu Zizhen, et al. The law of soil erosion of typical production and construction projects in Beijing [J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(5):33-35.

(上接第 182 页)