

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.023

池金沼, 于洋, 冯娟龙, 等. 基于 RUSLE 模型的妫水河流域土壤侵蚀时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 70-78.

CHI Jinming, YU Yang, FENG Juanlong, et al. Spatial and temporal variation characteristics of soil erosion in Guishui River Basin based on RUSLE[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 70-78.

基于 RUSLE 模型的妫水河流域土壤侵蚀时空变化特征

池金沼¹, 于洋^{1,2}, 冯娟龙¹, 朱锐鹏¹, 左启林³, 朱洪盛¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100085; 2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100085;
3. 中建一局集团第三建筑有限公司, 北京 100161)

摘要: [目的] 为揭示流域土壤侵蚀时空变化特征并开展可持续流域治理工作。[方法] 基于妫水河流域 1995—2018 年降雨、土壤、数字高程模型及土地利用数据, 采用 GIS 技术与 RUSLE 模型的方法定量分析妫水河流域土壤侵蚀时空特征, 并对流域土壤稳定性进行评价。[结果] (1) 1995—2018 年, 流域内林地和草地面积均呈下降的趋势, 2018 年林地和草地面积分别为 4.41×10^4 , 0.84×10^4 hm^2 , 较 1995 年分别下降 13.52% 和 10.61%。耕地面积由 1995 年的 3.53×10^4 hm^2 增加至 2018 年的 4.07×10^4 hm^2 。建筑用地面积逐渐增加, 由 1995 年的 0.59×10^4 hm^2 增加到 2018 年的 1.90×10^4 hm^2 。(2) 妫水河流域内土壤侵蚀模数呈波动性变化, 由 1995 年的 $8.71 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 降至 $4.56 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 后, 于 2018 年升至 $11.07 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。(3) 妫水河流域土壤侵蚀强度以微度侵蚀和轻度侵蚀为主, 1995—2015 年, 土壤侵蚀强度逐渐降低并保持稳定, 中度及以上土壤侵蚀面积比例由 4.95% 降至 3.05%, 2018 年后升至 7.42%。(4) 妫水河流域在研究时段内土壤稳定性降低, 不稳定土壤面积升高。[结论] 妫水河流域城市化的进程中, 林草覆盖度略有降低; 土壤侵蚀强度整体下降, 但在后期略有提高; 不稳定土壤所占面积较少。研究结果可为妫水河流域综合治理及土地利用规划提供依据。

关键词: 妫水河流域; 土地利用; RUSLE; 土壤稳定性

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0070-09

Spatial and Temporal Variation Characteristics of Soil Erosion in Guishui River Basin Based on RUSLE

CHI Jinming¹, YU Yang^{1,2}, FENG Juanlong¹, ZHU Ruipeng¹, ZUO Qilin³, ZHU Hongsheng¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100085, China;

2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100085, China; 3. The Third Construction Co., Ltd. of China Construction First Group, Beijing 100161, China)

Abstract: [Objective] Detecting the spatial and temporal variation characteristics of soil erosion in river basins and carry out sustainable river basin management. [Methods] This study quantitatively analyzes the temporal and spatial characteristics of soil erosion in Guishui River Basin by RUSLE model based on the rainfall, soil, digital elevation model (DEM) and land uses datasets of Guishui River Basin from 1995 to 2018, meanwhile, the soil stability in the basin was evaluated. [Results] (1) The areas of forestland and grassland showed a decreasing trend from 1995 to 2018, respectively. In 2018, the areas of forestland and grassland were 4.41×10^4 and 0.84×10^4 hm^2 , respectively, which were 13.52% and 10.61% lower than those in 1995. The farmland area increased from 3.53×10^4 hm^2 in 1995 to 4.07×10^4 hm^2 in 2018. The area of building land has gradually increased, from 0.59×10^4 hm^2 in 1995 to 1.90×10^4 hm^2 in 2018. (2) The soil erosion modulus in Guishui River Basin fluctuated from $8.71 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ in 1995 to $4.56 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, and then increased to

收稿日期: 2023-06-25

修回日期: 2023-09-25

录用日期: 2023-11-10

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-12-05

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42177310)

第一作者: 池金沼 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与流域治理研究。E-mail: Aoakachi@163.com

通信作者: 于洋 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与流域治理研究。E-mail: yangyu@bjfu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

11.07 t/(hm² · a) in 2018. (3) The intensity of soil erosion in Guishui River Basin is mainly in slight erosion. From 1995 to 2015, the intensity of soil erosion gradually decreased and remained stable, and the proportion of moderate and above erosion area decreased from 4.95% to 3.05%, and increase to 7.42% after 2018. (4) In Guishui River Basin, the soil stability decreased and the unstable soil area increased during the study period. [Conclusion] In the urbanization process of Guishui River Basin, the coverage of forest and grass decreased slightly; the intensity of soil erosion decreased totally, but increased slightly in the last stage; unstable soil land takes up a small proportion. The results of this study provide a basis for comprehensive management and land use planning of Guishui River Basin.

Keywords: Guishui River Basin; land use and land cover; RUSLE; soil stability

Received: 2023-06-25

Revised: 2023-09-25

Accepted: 2023-11-10

Online(www.cnki.net): 2023-12-05

水土流失作为全球重要的生态环境问题之一,严重制约了区域生产力的发展和自然资源综合利用。在水力、风力等外营力的作用下,土壤侵蚀导致土壤及其母质的破坏、搬运和堆积,极易造成土壤的退化、肥力下降,甚至引起滑坡、泥石流等自然灾害,影响社会经济发展。我国是世界上土壤侵蚀较为严重的国家之一,根据 2021 年开展的水土流失动态监测^[1]显示,全国共有水土流失面积 267.42 × 10⁶ hm²。其中,水力侵蚀面积 110.58 × 10⁶ hm²,占水土流失总面积的 41.35%;风力侵蚀面积 156.84 × 10⁶ hm²,占水土流失总面积的 58.65%。其中,京津冀风沙源区是我国北方生态屏障的重要组成部分,2000 年该区组织实施京津风沙源治理工程以来,通过植被保护、植树种草、退耕还林、小流域综合治理,以及生态移民等措施,大力治理沙化土地,在保护和改善生态环境、调整农村经济结构、增加农牧民收入、促进社会和经济全面发展等方面发挥了重要作用,取得显著的生态、经济和社会效益^[2-3]。2015 年,国务院发布《京津冀协同发展规划纲要》^[4],指出推动京津冀协同发展是重大国家战略,并将京津冀整体定位为“生态修复环境改善示范区”。

当前,模型模拟是用于开展土壤侵蚀研究的主要途径之一,通用土壤流失方程(USLE)、修正通用土壤流失方程(RUSLE)、水蚀预报项目(WEPP)等土壤侵蚀模型逐渐被应用于不同尺度的土壤侵蚀评估与模拟^[5-6]。其中,修正的通用土壤流失方程因其可操作性强、适用范围广,在诸多地区得到应用。郭珂歆等^[7]利用通用修正土壤流失方程对北京市房山区的土壤侵蚀情况进行了模拟,结果表明,2013—2018 年,北京市房山区的土壤侵蚀总量减少 58.86%,且随时间推移,微度侵蚀面积逐渐上升;孙从建等^[8]使用修正通用土壤流失方程对鄂河小流域水土流失情况进行定量研究,结果表明,2000—2018 年,鄂河流域土壤侵蚀得到有效控制,土壤侵蚀由高等级逐步向低

等级转移;张素等^[9]采用通用土壤流失方程对孙水河流域土壤侵蚀空间分异特征进行了研究,结果表明,孙水河流域不同土地利用及坡度土壤的侵蚀状况不尽相同,坡耕地和中覆盖草地是流域内主要侵蚀土地利用类型,且当坡度低于 25°时,土壤侵蚀模数随着坡度的增加而增大;还有学者^[10]通过对阿尔及利亚的土壤侵蚀情况进行研究后发现,气候和地形是影响阿尔及利亚土壤侵蚀的主要原因。这些研究使用不同土壤侵蚀模型,针对不同时段、不同地区的土壤侵蚀情况进行了量化模拟,但在土壤侵蚀模数与土壤稳定性的联系方面的研究尚有欠缺。

妫水河流域属我国“三区四带”为核心的全国重要生态系统保护和修复重大工程布局的北方防沙带,近年来,妫水河流域城市化进程不断推进以及人类活动强度增加,使得流域内土壤侵蚀状况逐年变化,而实现经济发展与环境保护之间的协同是维系生态系统健康发展的关键^[11-12]。前人^[13-14]围绕妫水河流域已经开展了诸多报道,对妫水河流域的径流变化特征、面源污染以及植被覆盖变化进行了深入研究,但是对于流域土壤侵蚀及土壤脆弱性评价方面的报道较少。鉴于此,本文采用 RUSLE 模型,并结合多年区域土地利用数据,对妫水河流域 1995—2018 年土壤侵蚀时空变化特征进行计算。由于土壤稳定性是判别土壤侵蚀发生与否的重要依据之一,本文同时对流域土壤敏感性进行分析,评估土壤侵蚀变化特征,基于长时间序列综合展示妫水河流域土地利用变化、土壤侵蚀变化及土壤稳定性的变化情况,以期为妫水河流域的生态保护与流域综合治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

妫水河位于北京市延庆区,为永定河水域的一部分,发源于大吉祥村南,河流最终汇流于官厅水库(图 1)。妫水河流域集水面积为 1.06 × 10⁵ hm²,三面环山,地势东北高,西南低,中间地势较为平坦,位于 40°

22°23'—40°38'27"N, 115°49'03"—116°20'32"E, 海拔 459~2 216 m^[15]。妫水河流域属温带大陆性气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥。年平均降水量总计 474.03 mm, 且降水多集中于夏、秋两季, 占全年降水量的 58%~90%。作为北京地区重要的生态屏障, 是 2019 年世园会和 2022 年冬奥会的举办地, 素有“首都西北大门”之称。土壤类型以褐土为主, 西部山区多为棕壤, 潮土主要分布于妫水河及官厅水库沿岸。

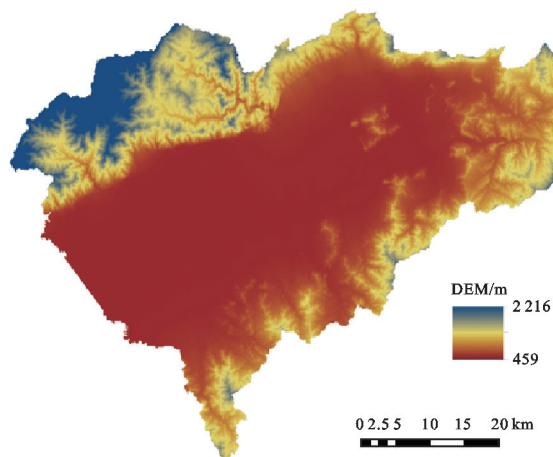


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

1.2 数据收集

本研究采用来自中国气象局数据网的降雨量数据, 并采纳世界气候网月降雨量数据作为补充; 土地利用数据来自中国多时期土地利用遥感监测数据集; 数字高程模型 (DEM) 来自美国 NASA 数据及产品中心; 土壤可蚀性因子基础数据来源于 1:100 万世界土壤数据集。数据列表及相应来源见表 1。

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

数据集	分辨率/m	年份	数据源
中国气象局数据网	—	1995—2018	https://data.cma.cn
世界气候网	12.5	1995—2018	http://www.worldclim.org
世界土壤数据库	12.5	—	Harmonized World Soil Database, HWSD
土地利用数据	30.0	1995—2018	http://www.resdc.cn

1.3 通用土壤流失方程

RUSLE 模型通过综合降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡长坡度因子、覆盖与管理因子、水土保持措施因子等的影响, 对土壤侵蚀进行定量评价^[16], 计算公式为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 为降雨侵蚀力因子 [$(MJ \cdot mm \cdot hm^2)/(h \cdot a)$]; K 为土壤可蚀性因子 [$(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$]; L 、 S

分别为坡长和坡度因子; C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子。将各个因子标准化到同一个投影坐标系, 投影为 Albers, 地理坐标系为 GCS_Krasovsky_1940。

1.3.1 降雨侵蚀力因子 降雨侵蚀力因子 (R) 能够反映降雨对土壤侵蚀的影响, 也是土壤侵蚀预报的重要因子。本文选取基于月平均降雨量和的 Wischmeier 公式计算降雨侵蚀力因子, 通过累加可得出年降雨侵蚀力^[17]。

基于月平均降雨量和年平均降雨量的 Wischmeier 降雨侵蚀力, 计算公式为:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{[(1.5 \times \lg \frac{P_i^2}{P}) - 0.8188]} \quad (2)$$

式中: P_i 、 P 为当年月平均降雨量与多年平均降雨量 (mm)。

1.3.2 土壤可蚀性因子 土壤可蚀性因子 (K) 是表征土壤对土壤侵蚀的敏感程度的指标。基于土壤中砂粒、粉粒、黏粒含量和有机 C 含量, 本文根据采用 WILLIAMS 等^[18]提出的 EPIC 公式对土壤可蚀性进行计算, 具体公式为:

$$K = 0.1317 \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 \text{SAN} \left(1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} - \text{SIL}} \right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \times \left(1 - \frac{0.7\text{SAN1}}{\text{SAN1} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SAN1})} \right) \quad (3)$$

式中: K 为土壤可蚀性因子值 [$(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$]; SAN 、 SIL 、 CLA 和 C 分别为砂粒 (0.05~2.000 mm)、粉粒 (0.002~0.05 mm)、黏粒 (<0.002 mm) 和有机碳含量; $\text{SAN1} = 1 - \text{SAN}/100$ 。

1.3.3 地形因子 地形因子是影响土壤侵蚀的重要因子之一, 包括坡长、坡度因子。流域尺度上的坡长坡度因子估算来源于对 DEM 数据的提取^[19-20]。本文采用地形起伏度的计算方法, 在 ArcGIS 10.3 中通过对高程数据模型的处理获得坡长坡度因子, 计算公式为:

$$H = H_{\max} - H_{\min} \quad (4)$$

式中: $H_{\max}$ 为邻域内出现的高程最高值; $H_{\min}$ 为邻域内出现的高程最低值; H 为地形因子。

1.3.4 植被覆盖与水土保持措施因子 植被覆盖因子和水土保持措施因子均采用经验方法获得, 其中 C 因子主要采用蔡崇法等^[21]的结果进行赋值。水土保持措施因子采用已有学者^[22-23]设置的 P 值进行赋值 (表 2)。

表 2 不同土地利用类型 C 值与 P 值

Table 2 C and P value of different land use type

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
C 值	0.350	0.006	0.040	0	0	1.000
P 值	0.350	1.000	1.000	0	0	1.000

通过反距离权重法对降雨侵蚀力因子进行可视化处理后,根据模型使用栅格计算器对不同因子图层计算,可以获得不同时期的土壤侵蚀模数图像。

1.4 土壤侵蚀强度分级

本文根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)^[24]对研究区域内的 RUSLE 模型模拟计算得到的土壤侵蚀模数进行分级(表 3)。

表 3 土壤侵蚀强度分级标准

Table 3 Soil erosion intensity grading standard			
土壤侵蚀强度		土壤侵蚀强度	
侵蚀模数/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)		侵蚀模数/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	
微度侵蚀	0~2	强烈侵蚀	50~80
轻度侵蚀	2~25	极强烈侵蚀	80~150
中度侵蚀	25~50	剧烈侵蚀	>150

1.5 土壤稳定性评估

通过 GIS 空间分析技术,根据研究区域的 DEM 高程数据和土地利用栅格数据图,对妣水河流域的土壤稳定性进行分析^[25-26]。根据土壤稳定性因子赋值表(表 4)对不同因子图进行分类后计算,对妣水流域土壤稳定性进行评估。

表 4 土壤稳定性因子赋值

Table 4 Soil stability factor assignment					
坡度/(°)	新值	坡向/(°)	新值	土地利用类型	新值
0~3	10	—1	10	耕地	2
>3~6	8	0~90	8	水域	8
>6~11	7	>90~270	7	草地	6
>11~20	5	>270~360	5	林地	10
>20~30	3			建设用地	4
>30	1				

计算公式为:

$$x = 0.4 \times \text{reland} + 0.3 \times \text{reaspect} + 0.3 \times \text{reslope} \quad (5)$$

式中:reland 为土地利用重分类值;reaspect 为坡向重分类值;reslope 为坡度重分类值。

通过土壤稳定性值对妣水河流域的土地稳定性进行分类。其中土壤稳定性分为 3 类,分别为不稳定(<4)、较稳定(4~7)和很稳定(>7)。

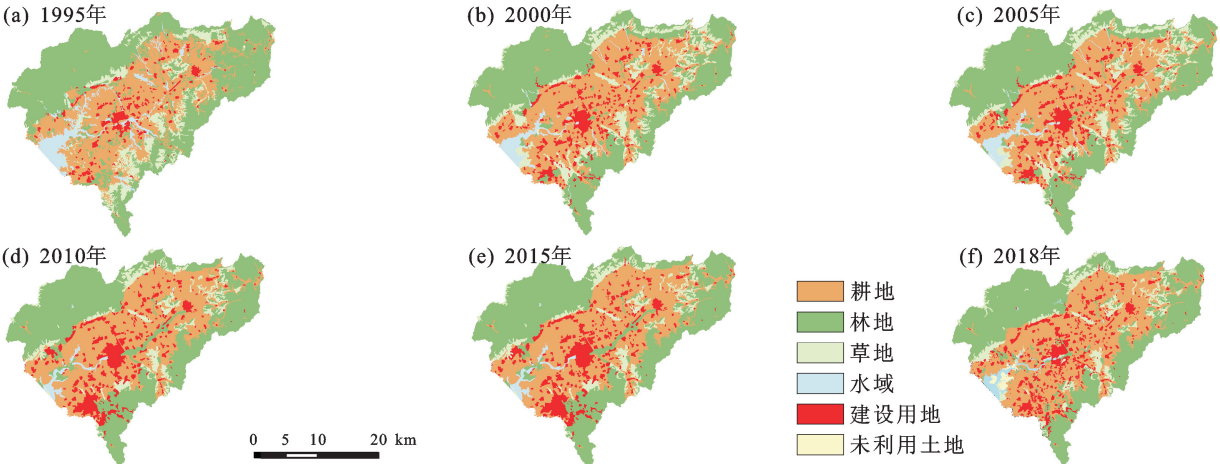


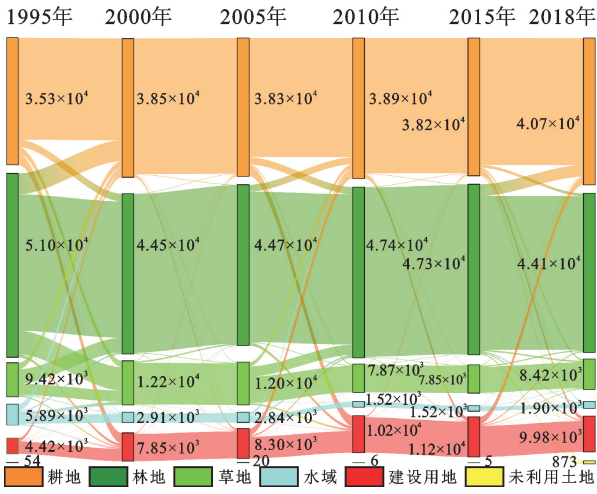
图 3 1995—2018 年土地利用类型

Fig. 3 The land use type from 1990 to 2018
<http://stbxb.alljournal.com.cn>

2 结果与分析

2.1 妣水河流域土地利用变化特征

由图 2 可知,1995—2018 年,妣水河流域耕地面积由 3.53×10^4 hm² 上升至 2018 年的 4.07×10^4 hm²,总面积上升 15.29%。林地为妣水河流域最大土地利用类型,面积由 5.10×10^4 hm² 降至 4.41×10^4 hm²,总面积下降 13.5%;草地面积由 9.42×10^3 hm² 下降至 8.42×10^3 hm²,总面积降低 10.6%,水域面积由 5.89×10^3 hm² 降至 1.90×10^3 hm²,总面积降低 67.74%;建设用地由 4.42×10^3 hm² 升至 9.98×10^3 hm²,总面积上升 125.79%;未利用土地由 54 hm² 升至 873 hm²。



注:图中数据为土地面积(hm²)。

图 2 1995—2018 年土地利用类型面积变化

Fig. 2 The change of land use type from 1995 to 2018

由图 3 可知,妣水河地区林草地主要集中分布于流域西北部山区以及东部地区。耕地与建设用地集中于流域中部平原地带。1995—2015 年,妣水河中部地区建设用地面积不断扩大,建设用地斑块面积大幅度上升;2018 年,建设用地面积下降,未利用土地斑块数量增加。

2.2 土壤侵蚀时空变化

由图 4 可知,1995—2010 年,妣水河流域的土壤侵蚀模数总体处于下降趋势。根据土壤侵蚀模数及土壤侵蚀量表(表 5),妣水河流域土壤侵蚀模数由

1995 年的 $8.71 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 下降至 2000 年的 $4.56 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。2015 年,土壤侵蚀情况略有增强,土壤侵蚀模数升至 $4.91 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。2018 年,妣水河流域土壤侵蚀模数大幅度上升,达到 $11.07 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

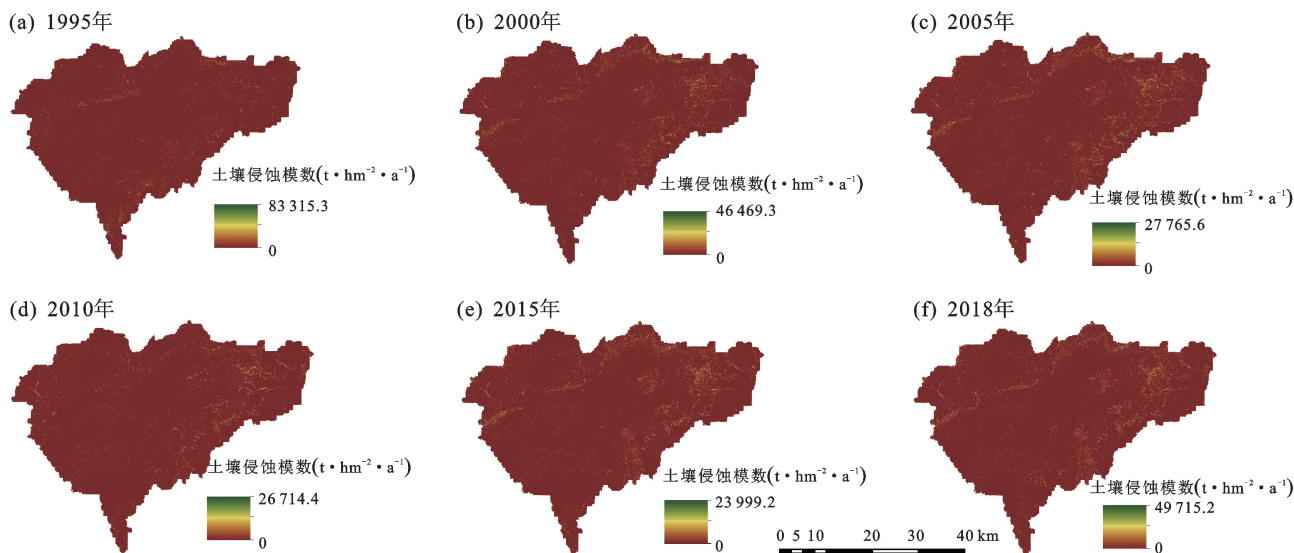


图 4 1990—2018 年土壤侵蚀模数

Fig. 4 Soil erosion modulus from 1990 to 2018

表 5 土壤侵蚀模数及土壤侵蚀量

Table 5 Soil erosion modulus and soil erosion amount

年份	土壤侵蚀模数/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	土壤侵蚀总量/ 10^5 t
1995	8.71	9.23
2000	7.12	7.55
2005	6.74	7.14
2010	4.56	4.83
2015	4.91	5.20
2018	11.07	11.73

2.3 妣水河流域土壤侵蚀强度空间分异

由图 5 可知,流域土壤侵蚀强度以微度侵蚀和轻度侵蚀为主。结合不同强度土壤侵蚀面积占比

(表 6)可以看出,1995 年,妣水河流域微度侵蚀和轻度侵蚀占比分别为 52.84% 和 42.18%。15 年间,微度侵蚀和轻度侵蚀的面积不断上升,2010 年,微度侵蚀和轻度侵蚀面积分别为 69.03% 和 31.11%;2018 年,微度侵蚀和轻度侵蚀的面积占比分别为 49.28% 和 46.17%。妣水河流域微度侵蚀主要分布于中心平原地带与西北部山区,呈片状分布。在西北山区以及西南地区,土壤侵蚀转为以轻度侵蚀为主,中度及以上侵蚀主要呈线状及片状分布,研究区西部及西北部的土壤侵蚀情况较其他地区更为严重。

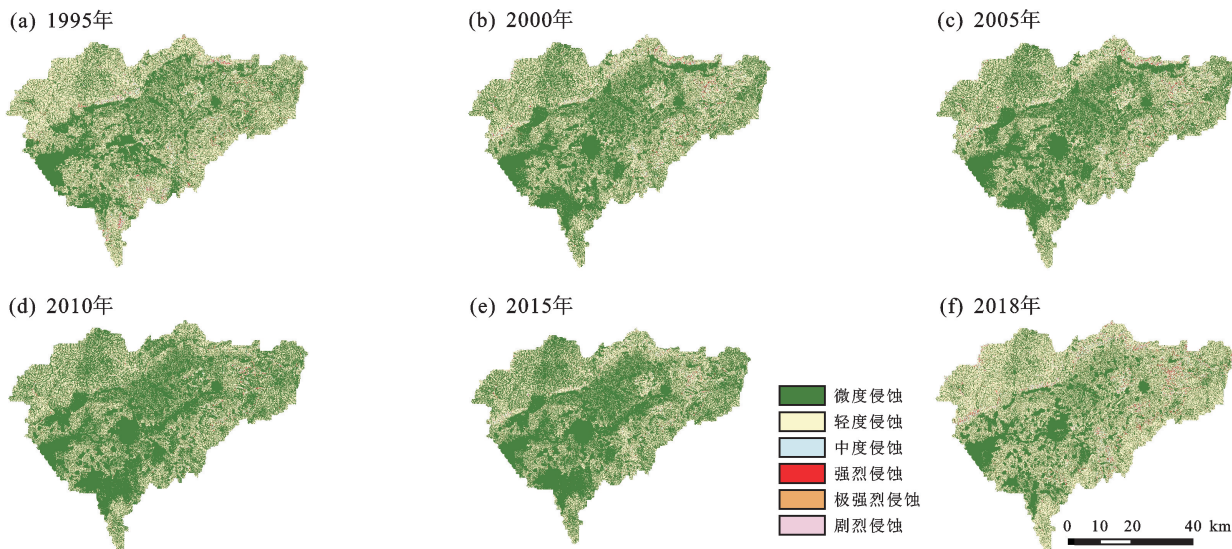


图 5 土壤侵蚀强度等级分布

Fig. 5 Soil erosion intensity class distribution

表 6 不同土壤侵蚀强度面积与占比

Table 6 Area and Proportion of different soil erosion strength

年份	微度侵蚀		轻度侵蚀		中度侵蚀		强度侵蚀		极强烈侵蚀		剧强烈侵蚀	
	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%
1995	56 010.4	52.84	44 710.8	42.18	2 883.2	2.72	1 091.8	1.03	731.4	0.69	540.6	0.51
2000	62 094.8	58.58	39 177.6	36.96	2 692.4	2.54	943.4	0.89	604.2	0.57	455.8	0.43
2005	62 912.6	59.36	38 520.4	36.34	2 618.2	2.47	901.0	0.85	583.0	0.55	424.0	0.40
2010	73 171.8	69.03	32 976.6	31.11	1 537.0	1.45	551.2	0.52	349.8	0.33	254.4	0.24
2015	71 751.4	67.69	33 350.2	31.67	1 939.8	1.83	625.4	0.59	381.6	0.36	286.2	0.27
2018	52 236.8	49.28	48 940.2	46.17	4 028.0	3.80	1 632.4	1.54	1 176.6	1.11	837.4	0.79

2.4 妫水河流域土壤稳定性空间分异

由图 6 可知,妫水河地区稳定土壤主要分布于妫水河流域除中部平原外的山地等林草覆盖地区;中部耕地及建设用地集中平原地段,土壤稳定性结果表现

为较稳定与不稳定,以点状分布;在中部平原区与西北及北部山区交界处,土壤则呈线状表现出不稳定特征。在时间尺度上,妫水河流域的土壤稳定性呈现下降趋势。2018 年,不稳定土壤斑块的分布面积明显上升。

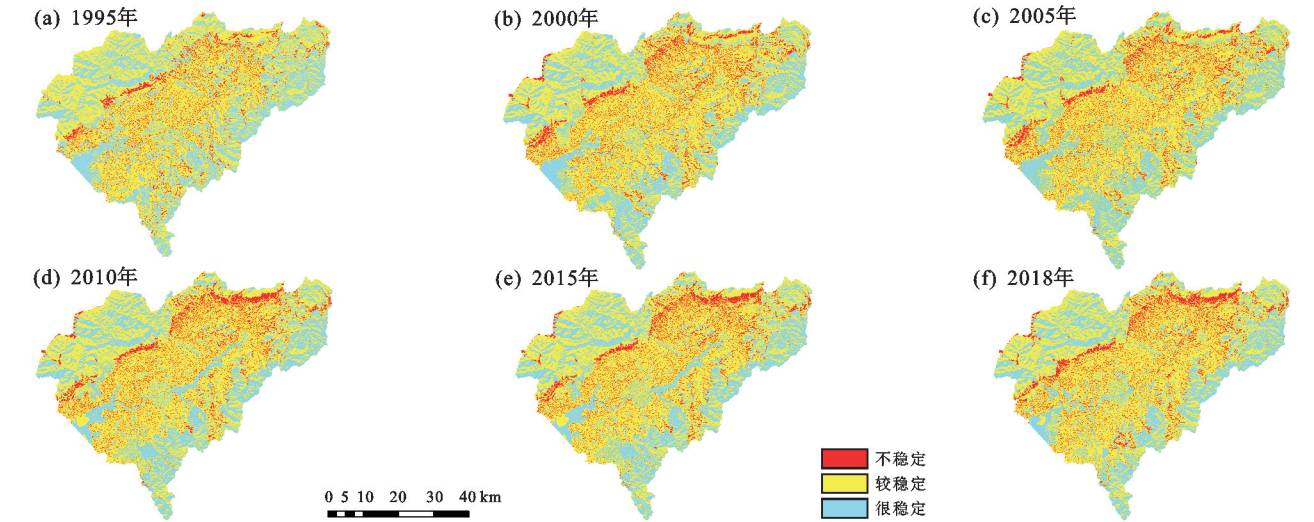


图 6 土壤稳定性等级分布

Fig. 6 Soil stability grade distribution

3 讨论

1995—2018 年,妫水河流域建设用地面积大幅上升,水域、草地面积小幅减少后保持稳定,尤其在 2000 年后,建设用地扩张速度明显加快,结合前人^[27]对北京市近 30 年的土地利用时空变化方面的研究,建设用地的面积快速扩张,水域与建设用地面积逐步减少趋势来看,变化的总趋势与本文基本相符。其中,草地面积变化的结果也与胡莹洁等^[28]的报道一致。1995—2018 年,妫水河流域林地面积表现出先下降后增长的趋势。结合北京市政府为加强大气治理、改善区域生态环境,在流域内开展的生态建设工程,例如,平原区造林工程等,使林地面积稳中有升^[29]。1995—2018 年,妫水河流域耕地面积上升后保持稳定。对比相关学者对北京市耕地面积的研究结果,1990 年以来,北京市耕地面积处于收缩趋势,2010 年起,耕地面积的缩减规模有所减少,变化趋势有所差异。通过与前人研究对比发现,北京市耕地主

要分布于城市区域北部、西南部和南部地区,在北京市东北部妫水河流域也有集中分布。耕地面积变化趋势的不同,可能是因为研究区域仅仅包含妫水河流域,而非对整个北京地区的耕地面积进行统计。结合张晓光等^[30]对延庆区国土规划的研究结果,妫水河流域位于延庆区新城周边地区,人口数量的增长也是妫水河流域耕地数量上升的原因之一。

1995—2018 年,妫水河流域的土壤侵蚀模数呈现出先下降,后上升的趋势。其中 1995—2015 年,妫水河流域土壤侵蚀模数逐步下降并保持稳定。2018 年,妫水河流域土壤侵蚀模数总体呈现上升趋势。结合施卫良等^[31]的研究结果,随着北京城市化的进程,妫水河流域建设用地的面积不断增加,导致裸露土壤面积减少,产生土壤侵蚀的面积也逐渐减少。金凤梅^[32]对 RUSLE 模型中影响土壤侵蚀模数的因子得出结论,降雨侵蚀力因子的高低与土壤侵蚀模数呈正相关。结合本次研究中降雨侵蚀力因子的结果,2018 年,由于降雨量增加,降雨侵蚀力因子的数值相较往

年上涨 1 倍。因此,降雨侵蚀力因子的大幅上升是妫水河流域 2018 年土壤侵蚀模数升高的原因之一。由于世园会、冬奥会场馆建设及其配套路网、水电工程等的建设过程对原有的植被造成扰动,影响妫水河流域地表植被覆盖且导致未利用土地面积有所上升,也可能是 2018 年妫水河流域土壤侵蚀模数上升的一个潜在原因^[33]。

本研究发现,妫水河流域土壤以很稳定和较稳定为主,且在 1995—2018 年,不稳定土壤面积略有上升趋势。其中,不稳定和较稳定土地主要分布于妫水河流域中部平原地区。结合妫水河流域的开发建设进行分析,不稳定土地利用类型沿白河堡水库南北干渠的修建线路呈线状分布,2 条干渠的施工是导致沿线土壤稳定性下降的可能原因之一。

通过对流域内土壤侵蚀强度与区域土壤稳定性结果的对比分析,妫水河流域土壤稳定性较低的区域基本可以与中度及以上土壤侵蚀强度发生的地区相对应;妫水河流域土壤不稳定地区基本是中度及其以上土壤侵蚀集中分布的地区。在未来的研究中,土壤稳定性可以作为估测中度及以上土壤侵蚀强度发生地区的依据之一。

4 结 论

(1)1995—2018 年,妫水河流域建设用地面积大幅度上升,尤其在 2005 年后,上升速度明显加快。林地与草地面积略有下降,林草覆盖度略有降低。

(2)妫水河流域土壤侵蚀主要以微度侵蚀和轻度侵蚀为主。1995—2010 年,妫水河流域土壤侵蚀模数呈下降趋势;2015 年,土壤侵蚀模数基本保持稳定。2018 年,土壤侵蚀模数有所上升,中度及以上土壤侵蚀的面积有所提高。

(3)1995—2018 年,妫水河流域土壤稳定性总体呈稳定与很稳定状态,但流域局部呈不稳定状态,主要分布在白河堡水库南北干渠和冬奥场馆附近。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部.2008 年中国水土保持公报[J].中华人民共和国水利部公报,2010(1):19-31.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin of soil and water conservation[J].Gazette of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China,2010(1):19-31.
- [2] 中国林业科学研究院.京津冀风沙源区沙化土地治理技术将取得新的突破[J].林业科技通讯,2016(10):82.
Chinese Academy of Forestry. New breakthrough will be made in desertification land control technology in sandstorm source area of Beijing-Tianjin-Hebei [J]. Forest Science and Technology,2016(10):82.
- [3] 陈亮,张楠,王一帆,等.京津冀地区碳排放强度变化的驱动因素及其归因分析:基于细分行业与五年规划的视角[J].中国环境科学,2023(4):1-17.
CEHN L, ZHANG N, WANG Y F, et al. Driving factors and attribution analysis of carbon emission intensity change of Beijing-Tianjin-Hebei region: Based on the perspective of subdivided industries and five-year plan [J].Chinese Environment Science,2023(4):1-17.
- [4] 忻恺.《京津冀协同发展规划纲要》与区域发展[D].上海:上海财经大学,2021.
XIN K.《Outline of Coordinated Development of the Beijing-Tianjin-Hebei Region》and regional development [D].Shanghai: University of Finance and Economics,2021.
- [5] 孙超,韩伟刚,齐苑儒.基于 USLE 模型的泸瀾河流域土壤侵蚀研究[J].水利与建筑工程学报,2023,21(1):226-232.
SUN C, HAN W G, QI Y R. Soil erosion in Chanba River Basin based on USLE model[J].Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21(1): 226-232.
- [6] 徐少杰,邓良,赵明松,等.安徽省 1980—2020 年土壤侵蚀时空变化特征[J].科学技术与工程,2023,23(1):109-116.
XU S J, DENG L, ZHAO M S, et al. Spatial-temporal characteristics of soil erosion in Anhui Province from 1980 to 2020 [J].Science Technology and Engineering, 2023,23(1):109-116.
- [7] 郭珂歆,艾刚,马兴祥,等.北方土石山区土壤侵蚀对典型地形因子的响应:以北京市房山区为例[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(4):137-142.
GUO K X, AI G, MA X X, et al. Response of soil erosion to typical topographic factors in the rocky mountain area of North China: Taking Fangshan district as an example[J].Science of Soil and Water Conservation,2021, 19(4):137-142.
- [8] 孙从建,林若静,郑振婧,等.基于水土流失经验模型(RUSLE 模型)的黄河中游典型小流域水土流失特征分析[J].西南农业学报,2022,35(1):200-208.
SUN C J, LIN R J, ZHENG Z J, et al. Characteristic analysis of soil and water loss in typical small watersheds of the Middle Yellow River based on RUSLE model[J].Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2022,35(1):200-208.
- [9] 张素,熊东红,吴汉,等.基于 RUSLE 模型的孙水河流域土壤侵蚀空间分异特征[J].水土保持学报,2021,35(5):24-30.
ZHANG S, XIONG D H, WU H, et al. Research on spatial variation of soil erosion in Sunshui River Basin based on RUSLE model[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):24-30.
- [10] SAOUD M, MEDDI M. Estimation of soil erosion and sediment yield in Wadi El Hachem watershed (Algeria) using the RUSLE-SDR approach[J].Journal

- of Mountain Science, 2023, 20(2): 367-380.
- [11] 贾晓红, 吴波, 余新晓, 等. 京津冀风沙源区沙化土地治理关键技术研究及示范[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7040-7044.
JIA X H, WU B, YU X X, et al. Research and demonstration of pivotal technology on desertified land restoration in Beijing-Tianjing-Hebei sandstorm source zone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7040-7044.
- [12] 蔺星娜. 京津冀地区土壤风蚀扬尘启动传输特征及防治措施研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
LIN X N. Study on the characteristics of soil wind erosion dust starting transmission and its control measures in Beijing-Tianjin-Hebei region [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [13] 安晨, 方海燕. 基于 SWAT 模型的妫水河流域径流空间分布特征[J]. 水文, 2021, 41(4): 81-87.
AN C, FANG H Y. Spatial distribution characteristics of runoff in Guishui River Basin based on SWAT model [J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(4): 81-87.
- [14] 高春泥. 妫水河流域面源污染特征及其典型控制措施研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
GAO C N. Characteristics of non-point source pollution and typical control measures research in Guishui watershed [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [15] 冀丰渊. 京津冀协同发展规划纲要[C]// 廊坊市应用经济学会. 对接京津: 破解京津冀一体化与推动区域协同发展 (对接京津与环首都沿渤海第 13 次论坛 [二]) 论文集. 廊坊市: 中国经济出版社, 2016: 5-14.
JI F Y. Outline of Beijing-Tianjin-Hebei coordinated development plan [C]// Langfang application economic institution. Docking Beijing and Tianjin: Solving the problem of Beijing-Tianjin-Hebei integration and promoting the coordinated development of regional economy (the 13th Forum on Docking Beijing and Tianjin and Surrounding the Capital along Bohai Sea [2]). Langfang: Economic Press China, 2016: 5-14.
- [16] PINSON A O, AUBUCHON J S. A new method for calculating C factor when projecting future soil loss using the Revised Universal soil loss equation (RUSLE) in semi-arid environments[J]. Catena, 2023, 226: e107067.
- [17] RICHARDSON C W, FOSTER G R, WRIGHT D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount [J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(1): 153-156.
- [18] WILLIAMS J, NEARING M, NICKS A, et al. Using soil erosion models for global change studies[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(5): 381-385.
- [19] 蒋刚, 康金莲, 曹广超, 等. 基于 RUSLE 模型的青海澜沧江流域土壤侵蚀研究[J]. 高原科学研究, 2022, 6(4): 1-13.
JIANG G, KANG J L, CAO G C, et al. Study on soil erosion of Lancang River Basin in Qinghai based on RUSLE model [J]. Plateau Science Research, 2022, 6(4): 1-13.
- [20] 环境保护部. 环境保护部召开部常务会议 审议并原则通过《“生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和环境准入负面清单”编制技术指南(试行)》[J]. 环境与发展, 2017, 29(10): 8.
The Ministry of Environmental Protection. The Ministry of Environmental Protection convened an executive meeting of the Ministry to review and approve in principle the Technical Guide for the Compilation of “Red Line of Ecological Protection, Bottom Line of Environmental Quality, Negative List of Resource Utilization and Environmental Access” (Trial) [J]. Environment and Development, 2017, 29(10): 8.
- [21] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
CAI C F, DING S W, SHI Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000, 14(2): 19-24.
- [22] 张岩, 袁建平, 刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1033-1036.
ZHANG Y, YUAN J P, LIU B Y. Advance in researches on vegetation cover and management factor in the soil erosion prediction model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(8): 1033-1036.
- [23] 林锦阔. 基于 RUSLE 模型沂河流域土壤侵蚀研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2017.
LIN J K. Study on the soil erosion in the Yi River basin based on RUSLE model abstract [D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2017.
- [24] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
Ministry of water resources of the People's Public of China. Soil erosion intensity grading standard: SL 190—2007[S]. Beijing: China Water and Power Press, 2008.
- [25] 赵保睿, 匡明星, 王均浩, 等. 基于 ArcGIS 的土壤稳定性评估: 以张飞庙景区为例[J]. 北京测绘, 2020, 34(2): 229-232.
ZHAO B R, KUANG M X, WANG J H, et al. Soil stability assessment based on ArcGIS: Taking Zhangfei temple scenic area as an example [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2020, 34(2): 229-232.
- [26] 崔吉林, 陈丽, 方向京. 松花坝流域不同坡度及坡向土壤侵蚀的特征研究[J]. 西部林业科学, 2012, 41(6): 63-67.
CUI J L, CHEN L, FANG X J. Soil erosion characteristics of different slope gradients and aspects in Songhuaba watershed of Kunming [J]. Journal of West China Forestry Science, 2012, 41(6): 63-67.
- [27] 姚罗兰, 马杰, 李英军, 等. 北京市土地利用变化及其生

- 态环境效应研究[J].湖南农业科学,2021(8):91-94.
- YAO L L, MA J, LI Y J, et al. Study on Beijing land utilization change and its ecological environmental effect[J].Hunan Agricultural Sciences,2021(8):91-94.
- [28] 胡莹洁,孔祥斌,张宝东.30年来北京市土地利用时空变化特征[J].中国农业大学学报,2018,23(11):1-14.
- HU Y J, KONG X B, ZHANG B D. Spatiotemporal features of land use change in Beijing in the past 30 years[J]. Journal of China Agricultural University, 2018,23(11):1-14.
- [29] 郭全.面向多目标的妫水河流域土地配置优化研究[D].北京:北京林业大学,2019.
- GUO T. Study on optimization of land allocation in the Guishui river basin for multi-objectives [D]. Beijing: Beijing Forestry University,2019.
- [30] 张晓光,张险峰,杨丹丹.面向生态文明发展要求的国土空间规划探索:以延庆分区规划(国土空间规划)为例[J].城市发展研究,2021,28(7):27-33.
- ZHANG X G, ZHANG X F, YANG D D. The exploration of national land space planning catering to the development requirement of ecological civilization: A case study of Yanqing zoning plan (national land space planning) [J]. Urban Development Studies, 2021, 28 (7):27-33.
- [31] 施卫良,杨浚.北京分区规划之实践与探索[J].北京规划建设,2019(4):4-9.
- SHI W L, YANG J. Practice and exploration of Beijing zoning planning[J].Beijing Planning Review,2019(4):4-9.
- [32] 金凤梅.黄土高原土壤侵蚀时空变异与归因[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
- JIN F M. Spitaltemporal variability and attribution of soil erosion on the Loess Plateau [D]. Shaanxi Yangling: Northwest A&F University,2021.
- [33] 律可心,王子晔,姜群鸥,等.妫水河流域植被覆盖变化对土壤侵蚀控制效率的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(4):69-77.
- LÜ K X, WANG Z Y, JIANG Q O, et al. Effect of vegetation coverage change on soil erosion control efficiency in Guishui River Basin[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(4):69-77.
- (上接第 69 页)
- [29] LEJON D P H, CHAUSSOD R, RANGER J, et al. Microbial community structure and density under different tree species in an acid forest soil (morvan, France)[J].Microbial Ecology,2005,50(4):614-625.
- [30] TAKOUTSING B, WEBER J C, TCHOUNDJEU Z, et al. Soil chemical properties dynamics as affected by land use change in the humid forest zone of Cameroon [J].Agroforestry Systems,2016,90(6):1089-1102.
- [31] 聂跃平.碳酸盐岩性因素控制下喀斯特发育特征:以黔中南为例[J].中国岩溶,1994,13(1):31-36.
- NIE Y P. Karst development characteristics under the lithologic control of carbonate rocks: A case study in south-central Guizhou[J].Carsologica Sinica, 1994, 13 (1):31-36.
- [32] HUANG J, WU P T, ZHAO X N. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments [J]. Catena,2013,104:93-102.
- [33] DAI Q H, PENG X D, WANG P J, et al. Surface erosion and underground leakage of yellow soil on slopes in Karst regions of southwest China[J].Land Degradation and Development, 2018,29(8):2438-2448.
- [34] 李凤英,何小武,周春火.坡度影响土壤侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2008,15(6):229-231.
- LI F Y, HE X W, ZHOU C H. Advances in researches on slope gradient factor in soil erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008,15(6):229-231.
- [35] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].农业工程学报,2017,33(15):119-125.
- WANG D D, WANG Z L, ZHANG Q W, et al. Experiment on influence of cover degree, slope and rainfall intensity on sediment concentration of slope runoff in rangeland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (15): 119-125.
- [36] 赵传普,徐学选,陈天林,等.关川河流域土地利用变化对径流的影响[J].水土保持研究,2015,22(3):83-87.
- ZHAO C P, XU X X, CHEN T L, et al. Impact of land use changes on the streamflow in guanchuanhe watershed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22 (3):83-87.