

# 黄淮海平原降雨和景观格局变化对土壤侵蚀的影响

吕富荣<sup>1</sup>, 韩 镇<sup>1,2</sup>, 邓龙云<sup>1</sup>, 杨纪君<sup>1</sup>, 吴泉源<sup>1</sup>, 乔建民<sup>1</sup>

(1. 山东师范大学 地理与环境学院, 济南 250358; 2. 青岛国测海遥信息技术有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘 要:**为了更好地监测、治理土壤侵蚀,采用 GIS 空间分析、相关分析和多元回归方法,应用 USLE 方程对土壤侵蚀强度进行评估,量化景观格局指数的动态变化,在此基础上分析了 2000—2015 年黄淮海地区降雨和土地利用格局变化对土壤侵蚀的影响。结果表明:2000—2015 年黄淮海平原年均降雨量为 667.11 mm,在空间上自西北向东南增加,在时间上整体有降低趋势;土地利用的变化为耕地更分散、面积减少,建设用地更集中、面积增大;土壤侵蚀强度总体降低趋势明显,以微度侵蚀为主,集中在耕地,少数地区侵蚀剧烈,主要为草地和林地;与降水相比,土壤侵蚀强度受景观格局变化影响更大,平均邻近度指数越高,同类型斑块间景观连接性越好,土壤侵蚀强度越低。综上,景观格局是影响土壤侵蚀的重要因素,应重点关注人类活动对景观格局的影响,以更好地合理利用土壤资源和加强土壤侵蚀防治。

**关键词:**GIS; 黄淮海平原; 降雨; 土地利用; 土壤侵蚀; 景观格局

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0001-08

## Impact of Change in Rainfall and Landscape Pattern on Soil Erosion in Huang-Huai-Hai Plain

LÜ Furong<sup>1</sup>, HAN Zhen<sup>1,2</sup>, DENG Longyun<sup>1</sup>, YANG Jijun<sup>1</sup>, WU Quanyuan<sup>1</sup>, QIAO Jianmin<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358,  
China; 2. Qingdao Guoce Haiyao Information Technology Co. Ltd., Qingdao, Shandong 266000, China)

**Abstract:** In order to better monitor and control soil erosion, GIS spatial analysis, correlation analysis and multiple regression methods were used to evaluate soil erosion intensity by USLE equation, and the dynamic change of landscape pattern index was quantified. On this basis, the influence of change in rainfall and land use pattern on soil erosion in the Huang-Huai-Hai region from 2000 to 2015 was analyzed. The results show that from 2000 to 2015, the average annual rainfall of the Huang-Huai-Hai Plain was 667.11 mm, which increased spatially from northwest to southeast, and showed a general downward trend in time; the changes in land use were that the cultivated land was more dispersed and smaller, and the construction land was more concentrated and larger; the soil erosion had been alleviated, slight erosion was dominant, and concentrated on cultivated land, and erosion was severe in a few areas, mainly on grassland and forest land; compared with precipitation, soil erosion intensity is more affected by landscape pattern changes; the higher the CONTIG\_MN, the better the landscape connectivity between the same type of patches, and the lower the soil erosion intensity. To sum up, landscape pattern is a more important factor affecting soil erosion, and more attentions should be paid to the impact of human activities on landscape pattern in order to better rationally use soil resources and strengthen soil erosion control.

**Keywords:** GIS; Huang-Huai-Hai Plain; rainfall; land use; soil erosion; landscape pattern

土壤是人类最宝贵的自然资源和生存的基础<sup>[1]</sup>。然而,土壤侵蚀在全球范围内,尤其在中国影响面积约占国土面积的 37%,已成为限制当今人类生存发展的主要生态环境问题之一,严重制约着经济和社会

的可持续发展<sup>[2]</sup>。影响土壤侵蚀的因素主要有降水、地形、土地利用、土壤、植被覆盖以及人类活动等。其中,降雨和土地利用是影响土壤侵蚀最为显著的因素,也是目前国内外学者研究的热点之一<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期:2020-09-30

修回日期:2020-12-09

资助项目:山东省自然科学基金青年项目“黄淮海平原农业生态系统服务的驱动力及作用关系研究”(ZR2020QD011)

第一作者:吕富荣(1997—),女,山东济南人,硕士研究生,研究方向为景观生态学。E-mail: furong\_lv97@163.com

通信作者:乔建民(1988—),男,山东潍坊人,博士,讲师,主要从事景观生态与土地系统设计研究。E-mail: qjmwilson@sdnu.edu.cn

目前,全球气候正在以变暖的趋势显著变化<sup>[5]</sup>,气温的升高会加速水文循环,从而导致降雨量增加和强降雨事件的频发<sup>[6]</sup>。而降雨强度、降雨量和降雨空间分布是影响土壤侵蚀的重要因素<sup>[7]</sup>,Wischmeier<sup>[8]</sup>早在 1958 年就提出在降雨动能不可得时可以采用降雨量和最大 30 min 降雨强度的乘积计算降雨侵蚀力。许多学者通过降雨模拟试验研究表明,随着降雨强度的增加其径流和侵蚀量也显著增加<sup>[9-11]</sup>。红壤裸露坡地土壤侵蚀变化主要是降雨强度和降雨量共同作用的结果,降雨强度是直接因素,而雨量则通过改变降雨强度,从而间接影响土壤侵蚀<sup>[12]</sup>。另外,对于地形因子较大的区域,降雨量的增多对土壤侵蚀的影响更为显著<sup>[13]</sup>。此外,有研究发现流域尺度会影响降雨和土地利用对土壤侵蚀的影响程度,随流域面积增大,降雨对土壤侵蚀的影响减小,土地利用变化的影响变大<sup>[3]</sup>。

在人类活动作用下景观格局会发生显著的变化<sup>[14-16]</sup>,从而会引起土壤侵蚀的变化。以往景观格局对土壤侵蚀影响的研究主要根据土地利用变化和景观格局指数开展的<sup>[17-19]</sup>。基于 RULSE 模型的深圳市土壤侵蚀研究表明,土壤侵蚀主要发生在林地和园地<sup>[20]</sup>;对黄土丘陵沟壑区的研究表明,不同的土地利用类型影响其侵蚀产沙的景观格局指标不同,其中影响较大的有草地平均斑块面积、建设用地景观面积百分比和斑块密度以及其他类型用地斑块密度<sup>[21]</sup>。以上研究大多集中于黄

土高原等典型的土壤侵蚀严重的区域,对于黄淮海平原地区而言,既是农业主产区又是人口密集区,人类活动频繁,景观格局易受人类活动影响而发生剧烈变化,从而影响土壤侵蚀强度。本文基于 GIS 空间分析、相关分析和多元回归方法,应用 USLE 方程及景观格局指数方法,量化该区域降雨和土地利用变化对土壤侵蚀的影响,对土壤资源的合理利用以及减轻土壤侵蚀,治理生态环境具有重要意义。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

黄淮海平原位于我国东部沿海地区,位于 32°29′—40°34′N,112°26′—122°41′E,自北向南跨越从北京到安徽等 7 省市,面积近 40 万 km<sup>2</sup>,地势低平,大部分地区海拔 50 m 以下,东部沿海地区海拔 10 m 以下,其中海拔较高的地区分布在山东省中部,海拔达到 1 000 m 以上。黄淮海平原属于暖温带半湿润季风气候,年均气温为 11~15℃,南部地区年均温度为略高于北部,年降水量为 400~1 100 mm,主要集中在夏季,年际变化较大。土壤类型以潮土为主,养分丰富,适宜耕作,作物类型以小麦、水稻、玉米为主,是我国重要粮食产区。

1.2 数据源

本文所用数据主要包括黄淮海平原土地利用数据、土壤数据、地形数据和降雨数据,见表 1。

表 1 数据来源

数据名称	格式	空间分辨率	来源
黄淮海平原行政边界数据	SHP		中国科学院资源环境科学数据中心( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )
2000—2015 年年降水量空间插值数据	GRID	1 km	中国科学院资源环境科学数据中心( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )
2000—2015 年气象站点月降水量数据	TXT		国家气象科学数据中心( <a href="http://data.cma.cn">http://data.cma.cn</a> )
2000—2015 年土地利用数据	GRID	1 km	中国科学院资源环境科学数据中心( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )
2000—2015 年 NDVI 数据	GRID	1 km	中国科学院资源环境科学数据中心( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )
数字高程模型(DEM)	GRID	1 km	中国科学院资源环境科学数据中心( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )
中国土壤数据集	GRID	1 km	寒旱区科学大数据中心( <a href="http://bdc.casnw.net">http://bdc.casnw.net</a> )

2 研究方法

2.1 土壤侵蚀强度计算

研究利用 USLE 模型(通用土壤流失方程)对土壤侵蚀强度进行计算,其表达式为:

$$A=R\times K\times LS\times C\times P$$
 (1)

式中:A 为单位面积年均土壤侵蚀量[t/(hm<sup>2</sup>·a)];R 为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)];K 为土壤可蚀性因子[t·h/(MJ·mm)];L 和 S 为地形因子,均无量纲,其中 L 为坡长因子,S 为坡度因子;C 为植被覆盖与作物管理因子,无量纲;P 为水

土保持措施因子,无量纲。

各因子的计算公式见文献[22—28]。其中,水土保持因子是参考已有研究成果和研究区土地利用和坡度的实际情况进行赋值。其中,林地、草地属于未采取水土保持措施的自然景观,赋值为 1,水域、建设用地不发生土壤侵蚀,赋值为 0,而耕地和未利用地有一定水土保持措施,受坡度影响较大,采用表 2 进行赋值。在本研究中,土地利用数据共有 4 期,以 2000 年土地利用数据表征 2000—2004 年土地利用/覆被格局,同理 2005 年表征 2005—2009 年,2010 年表征 2010—2014 年,2015 表征 2015 年。

表 2 黄淮海平原耕地和未利用地 P 因子

坡度/(°)	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	>6
P 值	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7

根据《土壤侵蚀分类分级标准》,将计算得到的黄淮海平原土壤侵蚀强度划分为 6 个等级,见表 3。

表 3 土壤侵蚀分级标准

土壤侵蚀强度/ (t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	土壤侵蚀等级
<5	微度侵蚀
5~25	轻度侵蚀
25~50	中度侵蚀
50~80	强烈侵蚀
80~150	极强烈侵蚀
>150	剧烈侵蚀

2.2 Mann-Kendall(M-K)检验和 Sen’s 分析

本文利用长期时间序列数据分析中经常使用的 M-K 非参数检验,分析了降雨量和土壤侵蚀强度在时间上的变化趋势。该方法不需要数据遵循特定的分布也不需要确定是否是线性趋势,同时也不受异常值的影响,能客观的表征趋势变化。

对于序列数据,  $x_i = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ , 确定所有成对值中  $x_i, x_j$  的大小, 记为  $S$  [公式(2)和(3)]。假设对于  $H_0$ , 数据在序列中随机排列, 趋势不显著, 对于  $H_1$ , 序列中存在单调递增或递减的趋势。

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \tag{2}$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \tag{3}$$

本研究中  $n=15$ , 通过  $Z$  值进行趋势检验[公式(4)]。在  $\alpha=0.05$  的显著性水平下, 当  $|Z| \leq |Z_{1-\alpha/2}|$  时接受原假设, 即趋势变化不显著; 当  $|Z| > |Z_{1-\alpha/2}|$  则拒绝原假设, 则认为趋势变化是显著的。

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{4}$$

$$\text{var}(S) = [n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)] / 18 \tag{5}$$

式中:  $m$  为是序列中的节点数;  $t_i$  为节点的宽度。

利用 Sen’s 方法来计算各个站点年降雨量变化斜率。

$$\beta = \text{median}(\frac{x_j - x_i}{j - i}) \tag{6}$$

2.3 降雨和景观格局贡献度评价

基于 2000—2015 年黄淮海地区气象站点逐月降水量数据, 探究降雨量的时空格局动态变化, 同时采用 Mann-Kendall 趋势检验法(M-K)对降雨的趋势变化进行分析。依照 LUCC 分类体系, 将 2000 年以来研究区内土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六大类, 对不同年份的土地利用类型分布情况、面积和百分比、转移矩阵进行计算, 分析土地利用类型的空间转移变化, 并从景观和斑块两个水平, 借助景观指数(表 4), 分析黄淮海平原的景观格局变化。在此基础上, 采用相关分析和多元回归分析方法, 量化降雨和景观格局变化在土壤侵蚀变化中的贡献度。

表 4 研究所用景观指数

指标类别	景观水平类型	景观指数	英文缩写
面积指标	景观	景观面积	TA
	斑块类型	最大斑块占景观面积指数	LPI
	斑块类型	景观百分比	PLAND
	斑块类型	平均斑块面积	AREA_MN
边缘指标	景观/斑块类型	边缘密度	ED
密度指标	斑块类型	斑块密度	PD
	景观	斑块数量	NP
形状指标	景观/斑块类型	景观形状指标	LSI
	斑块类型	平均形状指数	SHAPE_MN
	斑块类型	平均邻接度指数	CONTIG_MN
多样性指标	景观	香农多样性指标	SHDI
	景观	香农均匀度指标	SHEI
聚散性指标	景观/斑块类型	聚集指数	AI

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀强度时空分布

根据模型, 同时按土壤侵蚀分级分类将土壤侵蚀因子(附图 1)进行叠加后, 得到土壤侵蚀强度空间分布图(附图 2), 并统计了年均土壤侵蚀量(图 1A)及各类型面积和百分比(表 5)。在 2000—2015 年, 黄淮海平原内土壤侵蚀以微度侵蚀为主, 集中在研究区西部和南部地区, 面积约为 35 万 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 90% 以上。山东中部和东部沿海地区有轻度侵蚀和剧烈侵蚀, 主要为草地和林地, 地形主要为山地丘陵区, 坡度较大。2000—2015 年微度侵蚀区域增加了 6 370 km<sup>2</sup>, 由 92.62% 增加到 94.36%; 轻度侵蚀区减少了 2 040 km<sup>2</sup>; 在 2000—2015 年, 中度侵蚀、强烈侵蚀和剧烈侵蚀区面积较小, 低于总面积的 1%, 呈现先减后增趋势; 剧烈侵蚀区面积下降趋势明显, 由 2000 年 2.45% 降到 2015 年 1.42%, 面积减少了 3 820 km<sup>2</sup>(表 5)。利

用 M-K 趋势分析方法对 2000—2015 年土壤侵蚀强度的变化趋势进行分析(图 1B),结果显示 Z 值为

−2.84且绝对值大于 2.32(通过置信度 99%的检验),说明土壤侵蚀强度总体呈极显著下降趋势。

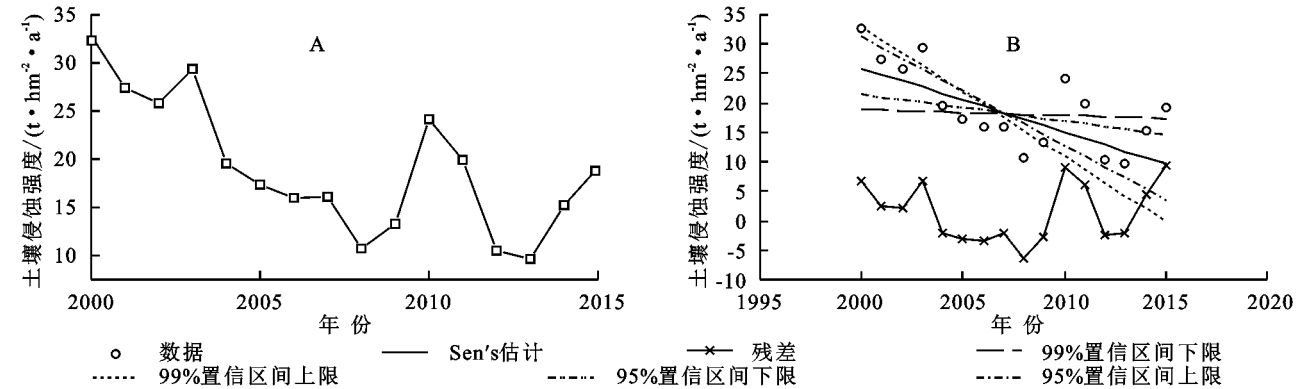


图 1 2000—2015 年土壤侵蚀强度变化

表 5 2000—2015 年土壤侵蚀面积及百分比

土壤侵蚀强度	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%
微度侵蚀	345290	92.62	359780	96.54	351620	94.35	351660	94.36
轻度侵蚀	12500	3.35	6120	1.64	9650	2.59	10460	2.81
中度侵蚀	2590	0.69	1110	0.3	2060	0.55	2290	0.61
强烈侵蚀	1370	0.37	610	0.16	1180	0.32	1330	0.36
极强烈侵蚀	1940	0.52	890	0.24	1540	0.41	1640	0.44
剧烈侵蚀	9120	2.45	4170	1.12	6630	1.78	5300	1.42

3.2 降雨趋势分析

2000—2015 年黄淮海平原年降水量分布如图 2、附图 3 所示,2007 年之前降雨变化幅度较大,2007 年之后变化相对较小,数值分布在 450~900 mm,整

体自西北向东南增加。从年际变化看,本研究通过 M-K 方法来分析 2000—2015 年年降水量变化,得到 Z 值为−0.77,表明年降水量呈非显著下降趋势。

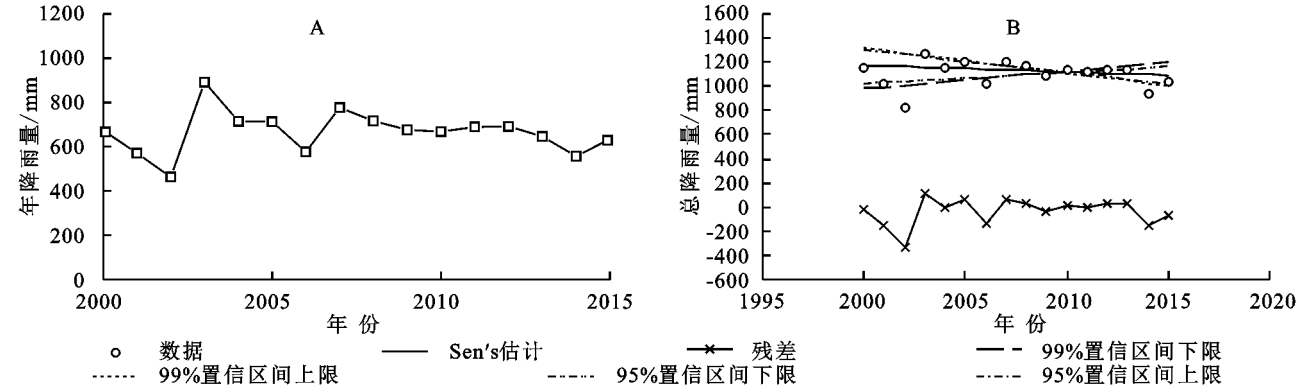


图 2 2000—2015 年降水量变化

为探究黄淮海平原空间上年降雨量的变化趋势,本研究采用 Sen's 分析法对 2000—2015 年年降水量数据进行分析,以斜率正负表示该站点降水量增加或减少,以绝对值大小表示变化多少,得到附图 4。研究区斜率均值为−2.81,说明整体呈降低趋势,北部东部以增长为主,中部及南部则以降低为主。其中,变化最剧烈的地区分别为山东省北、东部,变化斜率达 13 mm/a 以上,增长最明显;河南省南部和山东省南部,变化斜率低于−17 mm/a,降低幅度最大。

3.3 土地利用的时空格局动态变化

从空间分布上看,黄淮海平原 2000—2015 年的土地利用类型均以耕地、建设用地为主,耕地约占总面积的 75%,建设用地约占 13%。土地利用类型变化较剧烈的区域主要集中在北京和天津,有大量的耕地变为建设用地;山东省北部沿海地区,主要由草地变为耕地(附图 5)。由表 6 可知,在各个时间段耕地面积都呈减少趋势,建设用地呈增加趋势,林地、草地、水域和未利用地变化较小,趋于稳定。



由转移矩阵(表 6)可知,2000—2015 年,耕地转变为建设用地最多,达 8 061.08 km<sup>2</sup>;林地以转变为建设用地和耕地为主,分别有 147.49,59.58 km<sup>2</sup>;草地以转变为耕地为主,有 431.92 km<sup>2</sup>;水域以转变为耕地和建设用地为主,分别为 454.45,341.07 km<sup>2</sup>;建设用地以转变为耕地为主,达 930.87 km<sup>2</sup>;未利用地则以转变为耕地和建设用地为主,分别为 242.72,184.26 km<sup>2</sup>。

从景观水平上看(图 3),2000—2015 年黄淮海平原斑块数量(NP)减少了 659 个,下降了 1.8%,边缘密度上升了 2.76%,平均斑块面积增大了 1.83%,说明研究区小斑块数量减少,破碎度降低;香农多样性指数增加了 2.40%,香农均匀度指数增加了 2.39%,最大斑块占景观面积的比例下降了 2.77%,说明研究

区内不同土地利用类型分布更加均匀、集中。

对 2015 年 6 类土地利用类型的斑块类型水平指数与 2000 年指数做差,计算百分比,分析 2000—2015 年各土地利用类型的变化情况,得到表 7。根据表中指数变化情况,林地、草地、水域和未利用地相对稳定,而耕地、建设用地则变化较大。耕地景观百分比、最大斑块占景观面积的比例、平均斑块面积和聚合度指数降低,而斑块数量、边缘密度、景观形状指数增加,说明耕地面积减少,且聚合度降低,形状更复杂,分布更分散;建设用地景观百分比、最大斑块占景观面积的比例、边缘密度、平均斑块面积和聚合度指数均有增加,而斑块数量和景观形状指数则有小幅度降低,说明建设用地扩张明显,分布更加集中。

表 6 2000—2015 年土地利用转移矩阵 km<sup>2</sup>

年份	土地利用 类型	2005 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000 年	耕地	295351.66	72.71	53.99	664.08	<u>3499.38</u>	26.42
	林地	37.41	13132.35	1.34	21.73	<u>73.42</u>	0
	草地	<u>419.00</u>	4.99	16000.00	91.83	106.00	21.08
	水域	<u>351.00</u>	14.50	47.34	12000.00	181.00	14.71
	建设用地	<u>504.00</u>	4.93	5.35	32.34	46100.00	1.85
	未利用地	<u>218.00</u>	4.53	9.28	34.22	101.00	1930.00
年份	土地利用 类型	2010 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2005 年	耕地	294000.00	57.81	32.92	278.00	<u>2370.00</u>	15.18
	林地	12.82	13200.00	1.36	1.99	<u>33.91</u>	0
	草地	15.33	0.03	16100.00	15.47	<u>55.72</u>	6.44
	水域	<u>133.00</u>	10.74	2.31	12600.00	78.01	12.11
	建设用地	<u>375.00</u>	0.95	1.91	31.34	49700.00	3.84
	未利用地	28.20	0.91	1.29	16.39	<u>77.03</u>	1870.00
年份	土地利用 类型	2015 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2010 年	耕地	291864.90	30.21	37.19	166.48	<u>2581.73</u>	15.14
	林地	13.57	13191.46	1.16	2.00	<u>46.74</u>	0
	草地	14.19	0.25	16023.48	8.25	<u>43.10</u>	1.92
	水域	48.61	0.00	9.77	12798.72	<u>90.88</u>	8.00
	建设用地	<u>434.26</u>	3.34	12.71	10.27	51804.44	0.93
	未利用地	7.48	1.00	0	14.18	6.11	1881.16
年份	土地利用 类型	2015 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000 年	耕地	290252.54	153.09	118.02	1023.91	<u>8061.08</u>	49.8
	林地	59.58	13027.62	3.86	27.42	<u>147.49</u>	0
	草地	<u>431.92</u>	5.28	15876.82	126.11	199.39	28.61
	水域	<u>454.45</u>	25.61	56.34	11692.02	341.07	30.34
	建设用地	<u>930.87</u>	7.39	17.9	56.36	45617.08	3.4
	未利用地	<u>242.72</u>	6.44	9.33	62.34	184.26	1792.2

注:带下划线数字代表土地利用类型间变化最为剧烈。

3.4 降雨和土地利用变化对土壤侵蚀的影响

3.4.1 降雨对土壤侵蚀的影响 对比 2000—2015 年黄淮海平原年降雨量和土壤侵蚀强度的年际变化

折线图(图 1A,2A),发现二者都呈波动变化,但波动趋势并不完全一致,存在差异。尤其是在 2005 年、2007 年,黄淮海平原降雨量较多,但土壤侵蚀强度在这两年

并不高。通过分析其原因发现,土壤侵蚀强烈的区域主要集中在分布在坡度比较高的林地和草地集中区,多降雨

量导致 2005 年、2007 年该区域的植被覆盖度较高,对于土壤侵蚀的发生起到了明显的抑制作用。

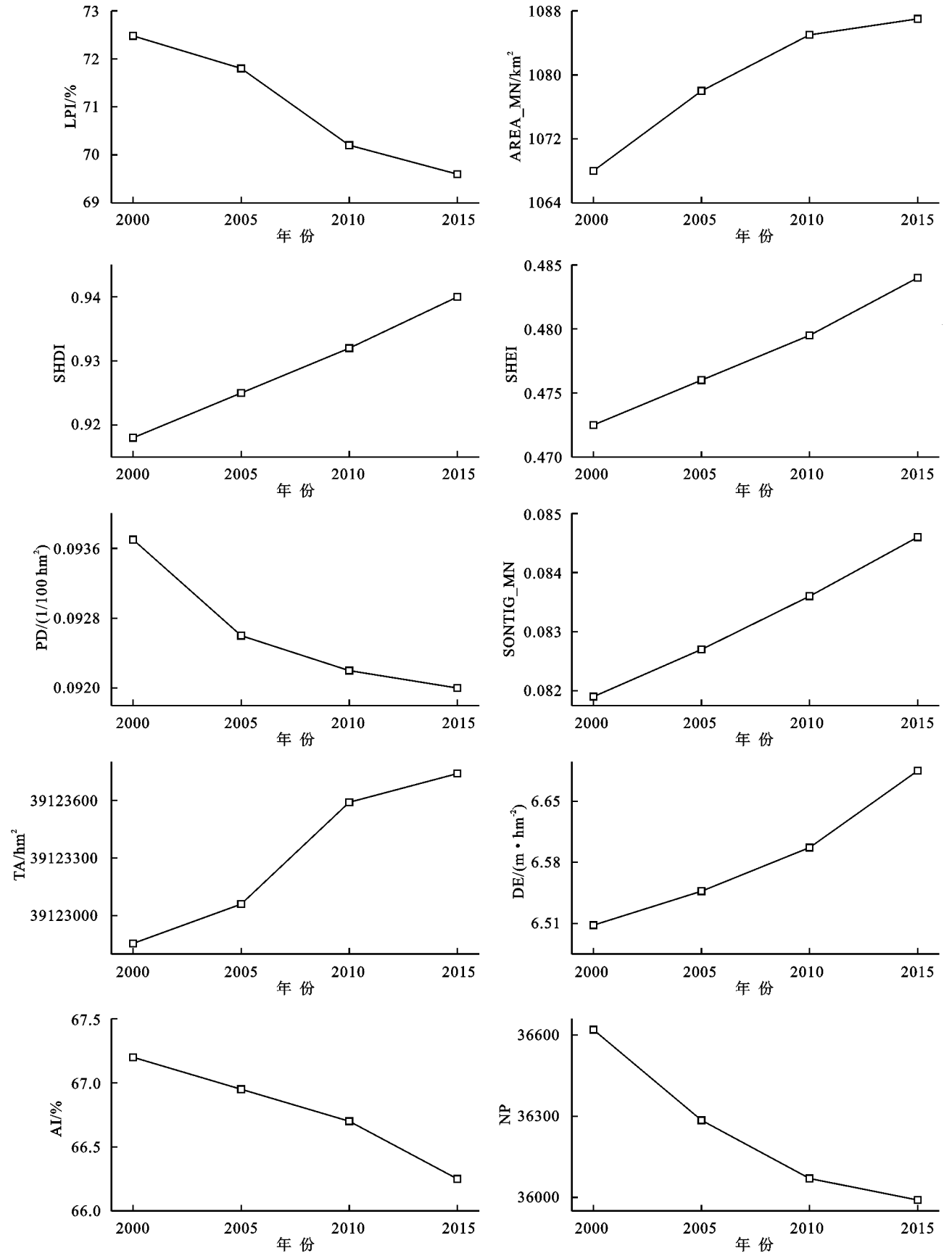


图 3 2000—2015 年景观水平指数

表 7 2000—2015 年各土地利用类型景观指数变化情况

%

土地利用类型	PLAND	NP	LPI	ED	LSI	AREA_MN	AI
耕地	−2.39	24.90	−3.82	2.53	3.73	−21.85	−1.27
林地	−0.53	−0.37	−0.24	−0.45	−0.04	−0.16	−0.10
草地	−3.72	−1.04	−0.66	−2.46	−0.71	−2.71	−1.94
水域	2.57	2.87	2.11	3.35	1.95	−0.29	−0.84
建设用地	13.14	−3.82	85.04	5.28	−0.83	17.63	19.00
未利用地	−16.28	−0.82	−24.87	−8.70	−0.37	−15.59	−15.25

3.4.2 土地利用变化对土壤侵蚀的影响 分析 2000—2015 年黄淮海平原土地利用和土壤侵蚀强度变化,土壤侵蚀强度呈显著下降趋势,土地利用变化以耕地减少、建设用地增加为主。以土壤侵蚀强度为因变量,以景观格局指数为自变量,进行相关分析。由于不同自变量数量级差异较大,研究将所有变量进行 Z-score 标准化后再进行计算(表 8)。从景观水平看,斑块数量与土壤侵蚀强度呈正相关,景观面积、景观性状指标、香农多样性指标和香农均匀度指标与土壤侵蚀强度呈负相关,其中斑块数量和景观面积对土壤侵蚀影响最强;从斑块类型看,斑块密度、最大斑块占景观面积比例和聚集指数与土壤侵蚀强度呈正相关,平均邻接度指数、平均形状指数和边缘密度与土壤侵蚀强度呈负相关,其中斑块密度、平均邻接度指数对土壤侵蚀影响最强。这说明,土壤侵蚀主要受土地利用类型的密度、形状和面积因素影响,斑块数量越多、形状越复杂、边界连通性越低、面积分布差别越大,土壤侵蚀越强。

表 8 景观指数与侵蚀强度的相关性分析

景观指数	英文缩写	R <sup>2</sup>	标准系数	显著性
斑块密度	PD	0.636	0.798	$p=0$
斑块数量	NP	0.533	0.730	$p<0.01$
平均邻接度指数	CONTIG_MN	0.530	−0.728	$p<0.01$
景观面积	TA	0.480	−0.695	$p<0.01$
平均形状指数	SHAPE_MN	0.473	−0.688	$p<0.01$
最大斑块占景观面积比例	LPI	0.451	0.671	$p<0.01$
景观形状指标	LSI	0.438	−0.662	$p<0.01$
聚集指数	AI	0.397	0.630	$p<0.01$
香农多样性指标	SHDI	0.391	−0.625	$p<0.01$
香农均匀度指标	SHEI	0.381	−0.617	$p<0.05$
边缘密度	ED	0.360	−0.600	$p<0.05$

3.4.3 降雨和土地利用变化对土壤侵蚀的影响 研究将年降水量和代表 7 种类别的景观格局指数与土壤侵蚀强度进行多元线性回归,最终建立的多元回归方程调整 R<sup>2</sup> 为 0.921, F 统计量为 25.848, 显著性  $p<0.01$ , 方程为:

$$y=4.171\times10^{-11}+0.017PPT+0.789PD-5.561CONTIG\_MN+2.419TA-1.827AI+0.9ED+0.568SHEI$$

(7)

式中的年降水量(PPT)、斑块密度(PD)、平均邻

接度指数(CONTIG\_MN)、景观面积(TA)、聚集指数(AI)、边缘密度(ED)和香农均匀度指标(SHEI),均为标准化后的值。

通过分析降雨和景观格局对土壤侵蚀强度的影响,发现 2000—2015 年黄淮海平原土壤侵蚀强度变化主要受景观格局的影响(表 9)。尽管降雨是土壤侵蚀的重要驱动力,但在 2000—2015 年,黄淮海平原降水变化不显著,在土壤侵蚀变化中的贡献度较小,仅占 0.14%,在 6 类景观指数中,贡献率最大的为平均邻接度指数,占 46.03%,其次为景观面积,占 20.02%,这说明土壤侵蚀强度主要受斑块形状和面积大小的影响。此外需要注意的是,平均斑块邻近度和聚集度对于黄淮海平原区的土壤侵蚀有负作用,两者越高,该区域土壤侵蚀强度越低,它们在土壤侵蚀强度变化的贡献为 61.15%。

表 9 多元线性回归自变量贡献率

自变量	标准系数	贡献率/%
年降水量	0.017	0.14
斑块密度	0.789	6.53
平均邻接度指数	−5.561	46.03
景观面积	2.419	20.02
聚集指数	−1.827	15.12
边缘密度	0.900	7.45
香农均匀度指标	0.568	4.70

4 结 论

研究表明,2000—2015 年,黄淮海平原的降水呈小幅度波动下降的趋势,2002 年降雨量最少,2003 年降雨量最多;在空间格局上,黄淮海平原降雨量自西北向东南逐渐增加;北部有所增加,中部和南部有所降低。2000—2015 年黄淮海平原土地利用类型均以耕地和建设用地为主,耕地面积呈减少趋势,其中减少的耕地中有 85.7%转变为建设用地;建设用地面积呈增加趋势。从景观水平上看,小斑块数量减少,破碎度降低,各土地利用类型分布更均匀。从斑块类型水平上,林地、草地、水域和未利用地相对稳定,而耕地、建设用地则变化较大。耕地聚合度降低,形状更复杂,分布更分散;建设用地聚合度增加,形状更简单,分布更加集中。

2000—2015 年,黄淮海平原区土壤侵蚀强度总体呈

下降趋势,土壤侵蚀量减少了 42%,以微度侵蚀为主,集中在耕地和建设用地分布区。侵蚀较强地区集中分布在黄淮海平原中部和东部,该区域以林地和草地覆盖为主,土壤侵蚀强度较高主要是因为地形坡度较大、植被覆盖度不高,难以阻止水土流失的发生。与降雨相比,黄淮海平原区景观格局变化对于土壤侵蚀的影响更大,其中以斑块平均邻接度对于土壤侵蚀的影响最为显著,相同斑块间景观连通性越好,土壤侵蚀越低。

#### 参考文献:

- [1] 庄建琦,葛永刚.土壤侵蚀对土地利用和降雨变化响应和空间分布特征:以金沙江一级支流小江流域为例[J].长江流域资源与环境,2012,21(3):288-295.
- [2] Cerdà A, Jordán A, Zavala L, et al. The contribution of mulches to control high soil erosion rates in vineyards in Eastern Spain [C] // Perk MVD. EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna: European Geosciences Union, 2014.
- [3] 钟莉娜,王军,赵文武.多流域降雨和土地利用格局对土壤侵蚀影响的比较分析:以陕北黄土丘陵沟壑区为例[J].地理学报,2017,72(3):432-443.
- [4] Kouli M, Souplos P, Vallianatos F. Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece [J]. Environmental Geology, 2009, 57(3):483-497.
- [5] 魏宁,魏霞.气候变化对黄土高原土壤侵蚀影响的回顾与展望[J].中国人口·资源与环境,2016,26(S2):23-26.
- [6] Nearing M A, Pruski F F, O'neal M R. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 59(1):43-50.
- [7] Li Z, Fang H. Impacts of climate change on water erosion: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 163:94-117.
- [8] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning[M]. Washington DC, USA: Department of Agriculture, 1978.
- [9] 郑伟,王中美.贵州喀斯特地区降雨强度对土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持研究,2016,23(6):333-339.
- [10] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等.降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):147-154,182.
- [11] Ziadat F M, Taimeh A Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(6):582-590.
- [12] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.
- [13] Maeda E E, Pellikka P, Siljander M, et al. Potential impacts of agricultural expansion and climate change on soil erosion in the Eastern Arc Mountains of Kenya[J]. Geomorphology, 2010, 123(3/4):279-289.
- [14] 张笑楠,王克林,张明阳,等.人类活动影响下喀斯特区域景观格局梯度分析[J].长江流域资源与环境,2009,18(12):1187-1192.
- [15] 徐凯健,曾宏达,任婕,等.亚热带典型红壤侵蚀区人类活动对植被覆盖度及景观格局的影响[J].生态学报,2016,36(21):6960-6968.
- [16] 贾艳艳,唐晓岚,唐芳林,等.长江中下游流域人类活动强度及其对湿地景观格局影响研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(4):950-963.
- [17] 张建香,张勃,张华,等.黄土高原的景观格局变化与水土流失研究:以黄土高原马莲河流域为例[J].自然资源学报,2011,26(9):1513-1525.
- [18] 李晶,周自翔.延河流域景观格局与生态水文过程分析[J].地理学报,2014,69(7):933-944.
- [19] 顾治家,谢云,李骛,等.利用 CSLE 模型的东北漫川漫岗区土壤侵蚀评价[J].农业工程学报,2020,36(11):49-56.
- [20] 张园眼,李天宏.基于 GIS 和 RUSLE 模型的深圳市土壤侵蚀研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(6):1189-1202.
- [21] 王计平,杨磊,卫伟,等.黄土丘陵沟壑区景观格局对流域侵蚀产沙过程的影响:斑块类型水平[J].生态学报,2011,31(19):5739-5748.
- [22] 黄启芬.贵州喀斯特山区土地利用格局变化及土壤侵蚀效应:以大方县为例[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2015,33(2):18-23.
- [23] 肖武,徐建飞,杨坤,等.基于 GIS 和 USLE 模型的巢湖流域土壤侵蚀评价[J].科学技术与工程,2017,17(16):35-43.
- [24] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the Asae, 1989, 30(5):1387-1396.
- [25] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5):1759-1763.
- [26] 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.
- [27] 黄婷,于德永,乔建民,等.内蒙古锡林郭勒盟景观格局变化对土壤保持能力的影响[J].资源科学,2018,40(6):1256-1266.
- [28] Lu J, Chen X, Li H, et al. Soil erosion changes based on GIS/RS and USLE in Poyang Lake basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2):337-344.