DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.012

太行山南麓鱼鳞坑坡面产流特征及其影响因素

欧会迪[1]，张锦豪[2]，李建菲[1]，唐 武[1]，张志华[1]

（1.河南农业大学 林学院，河南 郑州 450002；2.东北林业大学 林学院，黑龙江 哈尔滨 150000）

摘　要：［目的］通过研究太行山南麓鱼鳞坑坡面土壤产流特征，探讨其影响因素，为该区水土流失治理及生态环境保护提供科学依据。［方法］以太行山南麓鱼鳞坑坡和自然荒坡为研究对象，测定草本、灌木、乔木群落下坡面产流特征并分析其影响因素，运用地理探测器统计学方法量化各因素单独和交互作用对坡面产流的影响力。［结果］①鱼鳞坑坡草本、灌木、乔木群落的平均径流深之间没有显著性差异，自然荒坡灌木群落和草本群落的平均径流深显著大于乔木；与自然荒坡相比，鱼鳞坑坡草本群落、灌木群落、乔木群落的平均径流深分别减少了 56.61%，72.80%，39.58%；平均径流深随着砾石含量的增加呈减少趋势；砾石覆盖度对坡面产流的控制作用有一个阈值，当砾石覆盖度为 6%～9%时，坡面径流深最小。②太行山南麓鱼鳞坑坡面产流单因子影响力最大的是砾石覆盖度(0.31)，其次是植被盖度(0.29)。③坡面产流影响因子交互作用后大多表现为非线性增强和双因子增强作用；降雨因子与非降雨因子交互后均表现为非线性增强作用。［结论］大量砾石的存在导致了太行山南麓坡面产流过程的复杂性，增加植被盖度是减少该地区鱼鳞坑坡面产流的重要措施。

关键词：太行山南麓；坡面产流；地理探测器；砾石；植被盖度；鱼鳞坑

文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2024)02-0110-09　　**中图分类号：**S157.2，P333.5

文献参数：欧会迪，张锦豪，李建菲，等.太行山南麓鱼鳞坑坡面产流特征及其影响因素[J].水土保持通报，2024，44(2)：110-118.DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.012；Ou Huidi，Zhang Jinhao，Li Jianfei，et al. Characteristics of runoff and its influencing factors on fish-scale pit slopes in southern foothills of Taihang Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2024，44(2)：110-118.

Characteristics of Runoff and Its Influencing Factors on Fish-scale Pit Slopes in Southern Foothills of Taihang Mountains

Ou Huidi[1]，Zhang Jinhao[2]，Li Jianfei[1]，Tang Wu[1]，Zhang Zhihua[1]

(1.*College of Forestry*，*Henan Agricultural University*，*Zhengzhou*，*Henan* 450002，*China*；
2.*College of Forestry*，*Northeast Forestry University*，*Harbin*，*Heilongjiang* 150000，*China*)

Abstract：[Objective] The characteristics and influencing factors of soil runoff on fish-scale pit slopes in the southern slope of the Taihang Mountains were studied in order to provide scientific basis for soil erosion control and ecological environment protection in the area. [Methods] The study focused on the fish scale pits and natural barren slopes of the southern foothills of the Taihang Mountains. The runoff characteristics on slopes having different vegetation types including herbs，shrubs，and trees were measured，and the influencing factors were determined. The geographic detector statistical method was used to quantify the individual and interactive effects of various factors on slope runoff. [Results] ① There was no significant difference in the average runoff depth between herb，shrub，and tree communities on the fish scale pits. However，the average runoff depths of the shrub and herb communities on the natural barren slopes were significantly greater than that of the tree community. Compared to the natural barren slopes，the average runoff depth decreased by 56.61%，72.80%，and 39.58% in the herb，shrub，and tree communities on the

收稿日期：2023-10-13　　**修回日期：**2024-02-06

资助项目：国家自然科学基金项目“砾石对华北土石山区坡面水分运移的影响”(41807174)；河南省高等学校重点科研项目“华北土石山区主要造林树种水分利用策略及其影响机制”(24A220004)；河南省科技攻关项目“泡桐人工林碳源/汇特征及其对碳中和的贡献：以兰考县为例”(232103810014)

第一作者：欧会迪(1998—)，男(汉族)，河南省项城市人，硕士研究生，研究方向为土壤水文学。Email：Ouhuidi@stu.henau.edu.cn。

通信作者：张志华(1984—)，女(汉族)，宁夏回族自治区吴忠市人，博士，副教授，主要从事土壤水文学研究。Email：zhihua1221@163.com。

fish scale pits, respectively. The average runoff depth showed a decreasing trend with increasing gravel content. The control effect of gravel coverage on slope runoff had a threshold, and the minimum slope runoff depth was observed when the gravel coverage ranged from 6% to 9%. ② The single-factor influence of gravel coverage (0.31) was the highest on runoff of fish-scale pit slopes in the southern foothills of the Taihang Mountains, followed by vegetation coverage (0.29). ③ The interaction of slope runoff influencing factors mostly exhibited nonlinear enhancement and dual-factor enhancement effects. The interaction between rainfall and non-rainfall factors showed nonlinear enhancement effects. [Conclusion] The presence of a large amount of gravel contributed to the complexity of runoff processes on fish-scale pit slopes in the southern foothills of the Taihang Mountains. Increasing vegetation coverage is an important measure to reduce slope runoff in this region.

Keywords: southern foothills of the Taihang Mountains; slope runoff; geographical detector; gravel; vegetation coverage; fish-scale pit slopes

地表径流是土壤侵蚀、养分流失、水环境污染的动力[1]，在全世界范围内造成了严重的生态环境破坏[2]。坡面是地表过程发生发展的基础地理单元，是径流的主要发生地，研究坡面产流特征对解释径流产生机制、控制水土流失、保护生态环境有重要作用[3-4]。坡面径流受到降雨、植被、地形、土壤等多种因素的综合影响[5-6]。降雨是坡面径流的源动力，降雨特征如降雨量、降雨强度、降雨历时等均对坡面径流有影响。一般来说，降雨事件的降雨量越大、强度越高、历时越长，坡面产流量越多[7-8]。植被主要通过其冠层控制坡面径流[9]。从水文角度来看，植被冠层通过拦截和分流降雨减少雨滴的冲击能量和“飞溅”效应，为土壤提供物理保护，从而减少坡面径流[10]。然而，不同植被类型对坡面径流的控制效果存在差异，如 Wei 等[11]的研究表明，相较于牧场和林地，灌木林是控制坡面径流的最佳选择；Feng 等[12]在黄土高原延安北部 2 个坡度(5°和 15°)的径流样地研究了 5 种不同的植被类型对坡面产流的控制作用，发现人工草地的效果较好。坡面高低起伏的微地形改变了蓄水、入渗、汇流等水文过程，最终影响整个产流过程[13]。微地形如洼地，其截留降雨一方面延缓了产流和集水过程，推迟坡面产流；另一方面增加了水分的入渗作用，减少了坡面径流[14]。土壤因素如土壤容重及土壤机械组成通过改变土壤内摩擦角和黏聚力，控制着土壤力学性质的变化，从而影响坡面产流过程[15]；砾石覆盖度和砾石含量则通过改变地表的粗糙程度以及土壤孔隙结构影响坡面径流的产生和发展[16-17]。综上所述，坡面产流是一个复杂的耦合过程，在一定区域内受到降雨、植被、地形和土壤的共同作用。然而，先前的研究结果表明对坡面产流起到关键作用的主要因子并不一致。例如，赖承义等[18]的研究表明降雨因子是亚热带红壤区针叶纯林坡面产流的关键因素；朱燕琴等[19]认为雨强是黄土丘陵区坡面产流的主控因子，植被类型是主要限制性因子；罗娅等认为植被覆盖度变化是影响孤山川流域坡面产流的主要因素。此外，这些影响因素对坡面产流的控制作用有多大，其排序如何，两两间的交互作用是何种类型，仍需要我们进一步探究。

太行山南麓是京津冀经济区和华北粮仓黄淮海平原的重要生态屏障，属于典型的北方土石山区[20-21]。该地区微地形复杂多变，浅层不连续的土壤由片麻岩、石灰岩和页岩发育而成，含有大量的砾石碎片。20 世纪 70 年代，由于大规模的森林砍伐，当地的植被遭到破坏，水土流失严重，严重威胁了华北平原的生态安全。为了恢复生态环境，我国在此先后实施了“退耕还林工程”“天然林保护工程”等生态重建措施，进行了大面积的鱼鳞坑造林整地工程，形成了许多典型的鱼鳞坑坡。在这种复杂环境下关于坡面产流特征及其影响因素的研究鲜有报道。因此，本研究以太行山南麓鱼鳞坑坡和自然荒坡为研究对象，探讨太行山南麓坡面土壤产流特征及其影响因素，运用地理探测器统计学方法量化各因素单独和交互作用对坡面产流的影响力，为太行山南麓水土流失治理及生态环境保护提供科学依据。

1　研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于河南省济源市黄河小浪底地球关键带国家野外科学观测研究站(北纬 35°03′，东经 112°47′)，地处太行山南麓范围。该区属于暖温带大陆性季风气候，年平均降雨量为 613 mm，降雨季节上分布不均，6—9 月的降雨量占全年总降雨量的 68.3%，年平均气温 13.1 ℃。地形地貌复杂多变，土壤较为贫瘠，以棕壤、褐土为主，土壤质地主要是砂土。大规模的森林砍伐导致该地区生态系统结构简

单、水源涵养能力较差，水土流失严重。该区分布的乔木主要为栓皮栎（*Quercus variabilis*）、侧柏（*Platycladus orientalis*）和刺槐（*Robinia pseudoacacia*）等；灌木主要有酸枣（*Ziziphus jujube*）、荆条（*Vitex negundo*）等；草本以铁杆蒿（*Artemisia vestita*）、艾蒿（*Artemisia argyi*）、蒲公英（*Taraxacum mongolicum*）等为主。

1.2 径流小区设置与调查

由于造林整地工程的实施，研究区形成了许多含有鱼鳞坑的坡地。基于野外调查，2021年3月选择了一个实施了鱼鳞坑造林整地工程的坡地以及一个地形地貌与之相似且无人为干扰的坡地（在后文中称之为鱼鳞坑坡和自然荒坡）作为研究对象。鱼鳞坑坡度为19.05°，坡向为阳坡，海拔约为361 m。在鱼鳞坑坡面采用鱼鳞坑技术种植侧柏（*Platycladus orientalis*）幼苗。自然荒坡坡度为18.49°，坡向为阳坡，海拔约为360 m。两个坡面的植被类型为草本、灌木、乔木，因此按不同植被类型划分共建立了16个径流小区。鱼鳞坑坡建有草本径流小区、灌木径流小区、乔木径流小区各3个。自然荒坡的径流小区包括3个草本群落、2个灌木群落、2个乔木群落。自然荒坡难以建立更多的径流小区，主要是因为坡面宽度的限制及存在出露较大面积的基岩。径流小区的形状为长3 m，宽2 m的矩形，底部为三角形状的集流槽。径流小区的钢板侧壁插入土层中15～20 cm以防止径流测流，集流槽底部安装PVC管和集流桶，收集径流水样。

设置完径流小区之后，于径流小区侧壁外侧50 cm处设置3个采样点，清除地表的枯落物，用环刀和铝盒采集0—20 cm土壤样品。土壤样品带回实验室风干过筛以测量土壤理化性质。环刀法测定土壤容重；比重计法测定土壤机械组成；排水法测定砾石的体积分数。使用Zhu和Shao[22]报告的数字照片和处理技术调查砾石覆盖情况：在径流小区侧壁外侧的位置选取1个1 m×1 m样方，清除土壤表层的植被，将数码相机固定在离土壤表面1.5 m的位置进行拍照，采集到采样点的图像后，使用Image J软件对图像进行处理，最后得到砾石覆盖度数据；采用拍照法测定径流小区的植被盖度。此外，还测量了鱼鳞坑坡每个径流小区内鱼鳞坑的面积。

1.3 数据采集

在2021年7—11月每次降雨事件后，用量筒测定每个径流小区产生的径流量，文中用径流深即径流量/小区面积来表示径流小区的产流特征。测定产流量后，清理PVC管及集流桶以备下一次降雨。

降雨数据由设置在距研究地块1 km的自动气象站实时监测。从降雨数据中提取了每次降雨事件的降雨量、降雨历时、10 min最大雨强（I_{10}），20 min最大雨强（I_{20}），30 min最大雨强（I_{30}），60 min最大雨强（I_{60}）以及平均雨强。在选择降雨事件时，考虑了以下条件：①降雨事件为侵蚀性降雨，即降雨导致地表径流产生；②连续降雨间隔时间小于6 h视为一次降雨事件；③降雨事件的时间与地表径流记录的时间保持一致。

1.4 地理探测器

地理探测器（Geodetector）通过量化X与Y之间的空间分布相似性程度来表征自变量对因变量产生的影响力[23]。与研究水土保持影响因素的经典统计学方法相比，地理探测器无线性假设，既能分析地理空间数据又能分析属性空间数据，且在探究影响因子间的交互作用上有优势。地理探测器包括因子探测器、交互作用探测器、风险探测器以及生态探测器4个探测器。本研究使用的是因子探测器和交互作用探测器。因子探测器用于探测因变量Y的空间分异性以及自变量X对因变量Y空间分异性的解释力。交互作用探测器用于识别不同自变量之间的交互作用，即评估X_1与X_2共同作用时是增大还是减少了对Y的解释力，又或是X_1与X_2对Y的影响是独立的。

1.5 数据分析

采用SPSS 26.0中的单因素方差分析（one-way ANOVA）来检验不同植被覆盖类型下产流的差异性，并进行LSD事后检验，当$p<0.05$时，具有显著性差异。植被因子数据、土壤因子数据、降雨因子数据和鱼鳞坑面积数据的离散化以及对产流特征的因子探测和交互作用探测均利用R 4.2.2中的GD包完成。在Excel，Origin 2023，ArcGIS 10.5中完成图表绘制。

2 结果与分析

2.1 研究区降雨及土壤特征

研究区2021年总降雨量为1 335 mm，雨量丰富。本次监测从2021年7月1日开始至2021年11月30日结束，期间总降雨量为1 076 mm，占全年总降雨量的80.60%。监测期间筛选出降雨事件13次（表1），按照气象部门对降水等级的划分：小雨（12 h降雨量0.1～4.9 mm）5次，中雨（12 h降雨量5.0～14.9 mm）3次，暴雨（12 h降雨量30.0～69.9 mm）3次，大暴雨（12 h降雨量70.0～139.9 mm）2次。有效降雨事件的降雨量在2～260.4 mm之间，平均值为51.33 mm，降雨历时在1～95 h之间，平均值为24.46 h。

表 1　观测期间降雨事件的降雨特征

Table 1　Characteristics of effective rainfall events during observation period

降雨日期	降雨量/mm	降雨历时/h	I_{10}/(mm·h^{-1})	I_{20}/(mm·h^{-1})	I_{30}/(mm·h^{-1})	I_{60}/(mm·h^{-1})	平均雨强/(mm·h^{-1})	降雨等级
20210701	8.4	12	4.2	4.2	4	3.6	0.7	中雨
20210708	8.8	1	45.6	26.1	17.6	8.8	8.8	中雨
20210710	113.6	35	63.6	56.1	54.6	48.7	3.2	大暴雨
20210717	2.5	13	2.4	2.1	1.8	1.2	0.2	小雨
20210719	260.4	91	33.6	25.2	21.6	20.1	2.9	大暴雨
20210724	3.5	2	10.8	8.4	6.2	3.2	1.8	小雨
20210807	5.4	1	31.8	16.2	10.8	5.4	5.4	中雨
20210812	73.2	20	40.8	40.2	39.4	33.7	3.7	暴雨
20210822	34.4	20	13.8	12.3	9.8	6.5	1.7	暴雨
20210828	148.6	95	13.8	13.2	11.6	8.9	1.6	暴雨
20211014	3.9	13	8.4	6.3	4.4	2.6	0.3	小雨
20211019	2.6	8	1.2	0.9	0.8	0.7	0.3	小雨
20211120	2	7	1.2	0.9	0.8	0.7	0.3	小雨

研究区径流小区的植被及土壤特征如表 2 所示。鱼鳞坑坡平均植被盖度为 63.7%,3 种植被群落的盖度表现为:灌木>草本>乔木;自然荒坡平均植被盖度为 55.3%,3 种植被群落的盖度表现为:乔木>草本>灌木。

研究区土壤粒度含量表现为:砂粒>粉粒>黏粒,所有径流小区土壤质地均为砂土;土壤的砾石含量在 13.06% 至 36.30% 之间,平均砾石含量为 21.6%;砾石覆盖度在 1.57%~14.88%,平均砾石覆盖度为 11.18%。

表 2　径流小区植被及土壤特征

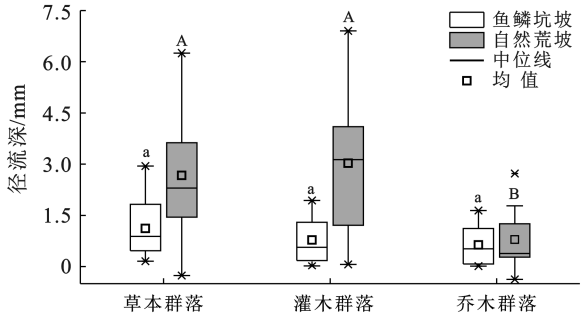
Table 2　Vegetation and soil characteristics of runoff plots

措施	小区编号	小区面积/m^2	植被类型	植被盖度/%	容重/(g·cm^{-3})	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	砾石含量/%	砾石覆盖度/%
鱼鳞坑坡	1	6	草本	70	1.44±0.11^{ab}	88.12±2.62^{ab}	6.50±2.20^{a}	4.68±1.89^{b}	34.78±20.36^{ab}	2.87
	2	6	草本	75	1.40±0.11^{ab}	89.27±1.08^{ab}	6.90±1.79^{ab}	4.36±1.26^{b}	36.30±15.57^{a}	3.45
	3	6	草本	40	1.36±0.07^{ab}	88.62±1.32^{ab}	7.95±0.84^{abc}	3.78±0.50^{b}	30.97±11.07^{abc}	4.04
	4	6	灌木	80	1.40±0.10^{ab}	89.48±2.24^{ab}	7.92±1.30^{cd}	2.64±0.68^{b}	25.98±12.47^{abc}	7.85
	5	6	灌木	75	1.39±0.19^{ab}	88.92±0.97^{ab}	8.52±1.34^{bcd}	3.00±0.30^{b}	28.46±11.73^{abc}	8.5
	6	6	灌木	60	1.40±0.10^{ab}	88.92±1.86^{ab}	8.20±1.91^{bcd}	3.01±0.90^{b}	20.38±14.39^{abc}	9.62
	7	6	乔木	65	1.36±0.06^{ab}	88.27±1.36^{ab}	9.40±0.71^{bcd}	2.38±0.66^{ab}	15.4±2.49^{abc}	14.88
	8	6	乔木	55	1.39±0.05^{ab}	87.76±1.05^{ab}	9.30±0.74^{bcd}	2.93±0.57^{b}	21.29±1.80^{abc}	13.04
	9	6	乔木	53	1.32±0.08^{ab}	89.12±1.14^{ab}	7.40±0.85^{cd}	2.48±0.85^{ab}	19.13±6.72^{abc}	11.18
自然荒坡	10	6	草本	72	1.47±0.06^{ab}	89.77±3.32a^{b}	7.58±3.38^{cd}	2.66±0.56^{ab}	14.57±7.51^{c}	11.47
	11	6	草本	30	1.45±0.10^{ab}	88.15±1.85^{ab}	9.48±2.00^{cd}	2.38±0.96^{ab}	17.21±9.04^{abc}	12.05
	12	6	草本	35	1.53±0.13^{a}	90.62±1.65^{a}	6.95±2.00^{cd}	2.43±1.06^{b}	21.55±7.01^{abc}	11.27
	13	6	灌木	45	1.39±0.04^{ab}	87.95±1.22^{ab}	9.53±1.25^{cd}	2.52±0.59^{ab}	13.06±6.21^{c}	4.61
	14	6	灌木	60	1.36±0.04^{ab}	89.39±2.77^{ab}	9.27±2.14^{d}	1.35±1.10^{ab}	16.69±6.31^{abc}	2.82
	15	6	乔木	75	1.31±0.01^{bc}	90.62±3.54^{a}	7.30±1.91^{d}	2.08±0.28^{b}	14.45±1.96^{c}	1.83
	16	6	乔木	70	1.2±0.11^{c}	86.49±3.81^{b}	11.83±4.36^{d}	1.68±0.69^{a}	15.38±4.77^{bc}	1.57

2.2　坡面产流特征

2.2.1　*不同植被群落下坡面产流特征*　如图 1 所示,鱼鳞坑坡草本群落、灌木群落、乔木群落的平均径流深表现为:草本群落(1.12 mm)>灌木群落(0.78 mm)>乔木群落(0.63 mm),但 3 种植被群落的平均径流深之间没有显著性差异。自然荒坡草本群落、灌木群落、乔木群落的平均径流深表现为:灌木群落(2.86 mm)>草本群落(2.58 mm)>乔木群落(1.05 mm),灌木群落和草本群落的平均径流深显著大于乔木($p<0.05$)。在研究区实施鱼鳞坑工程可有

效减少坡面径流。与自然荒坡相比，鱼鳞坑坡草本群落、灌木群落、乔木群落的平均径流深分别减少了56.61%，72.80%，39.58%。



注：小写字母和大写字母分别表示鱼鳞坑坡和自然荒坡 3 种植被类型的显著性差异分析结果。

图 1 两个坡面不同植被群落径流深差异性分析

Fig.1 Analysis of difference in runoff depth between different vegetation communities on two slopes

2.2.2 不同降雨条件下坡面产流特征 监测期间13 场有效降雨事件下的坡面径流深如图 2 所示。总体来说，径流深与降雨量、降雨强度的变化趋势相同，即径流深随着降雨量、降雨强度的增加而增加。观测期间最大降雨量出现在 7 月 19 日(290.4 mm)，此时鱼鳞坑坡达到最大平均径流深，为 1.81 mm；其次出现在 8 月 28 日(148.6 mm)，鱼鳞坑坡达到第二平均径流深，为 1.80 mm，自然荒坡达到最大平均径流深，为3.62 mm。观测期间最大平均雨强出现在 7 月 8 日(8.8 mm/h)，虽然降雨量只有 8.8 mm，但鱼鳞坑坡和自然荒坡平均径流深仍达到了 1.42 mm 和为 2.81 mm；与之相似的是 8 月 7 日，平均降雨强度为 5.4 mm/h，鱼鳞坑坡和自然荒坡平均径流深分别达到了 1.38 和3.41 mm。表明研究区的坡面产流由降雨量和雨强共同控制，例如在降雨量和雨强都较小的 7 月 17 日、10 月 19 日和 11 月 20 日，坡面径流深也同样很小。

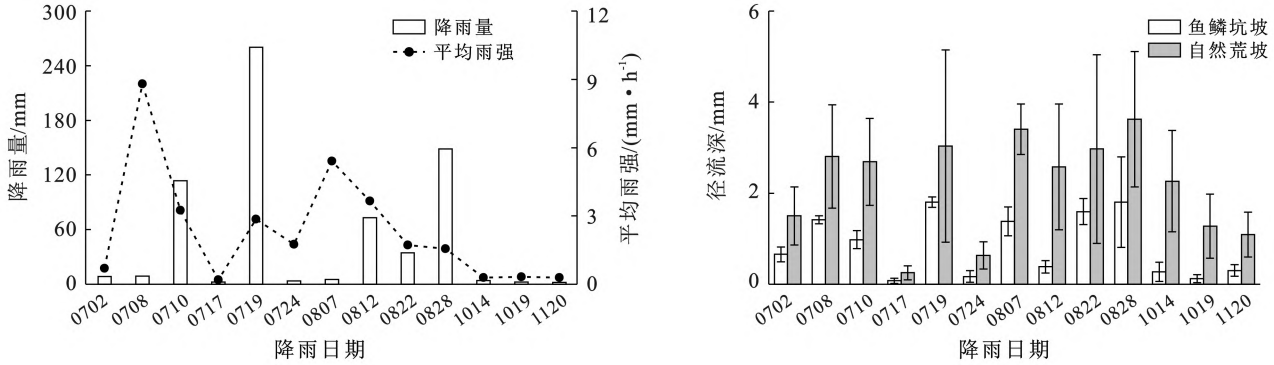


图 2 次降雨下坡面径流深变化

Fig.2 Changes of runoff depth on slopes under single rainfall

2.2.3 不同砾石含量及覆盖度下坡面产流特征 研究区土壤内部以及表层存在着大量的砾石，这些砾石会显著改变坡面产流过程[24]。如图 3a 所示，砾石含量<15%时，研究区坡面平均径流深最大，为2.39 mm；随着砾石含量的增加，平均径流深呈减少趋势，当砾石含量>25%时，平均径流最小，为 0.95 mm。如图 3b 所示，研究区坡面平均径流深随着砾石覆盖度的增加先是呈减少趋势，当砾石覆盖度在 6%～9%时，径流深达到最小值，为 0.7 mm，随后呈现增大趋势。

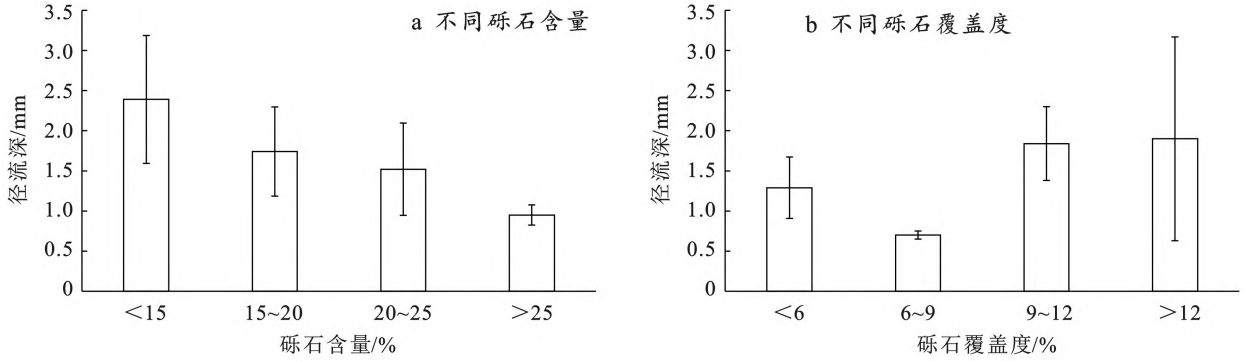


图 3 观测期间不同砾石含量和砾石覆盖度下坡面径流深变化

Fig.3 Changes of runoff depth on slopes under different gravel content and gravel coverage during observation period

2.3　坡面径流深的因子探测结果

地理探测器对坡面径流深的因子探测结果如图 4 所示。所有影响因素对坡面径流深的因子探测结果均显著($p<0.05$)，影响力大小排序为：土壤因子＞降雨因子＞植被因子＞微地形因子。土壤因子的探测结果均在 0.15 以上，表明土壤因子是研究区坡面径流深的重要影响因素。降雨因子是坡面产流的主导因素，除降雨历时和平均雨强外，其余因子解释力 q 值均在 0.21 以上。单个因子对坡面径流深影响最大的是砾石覆盖度，q 值达到了 0.31($p<0.05$)，其次为植被盖度，q 值达到了 0.29($p<0.05$)。植被类型对坡面径流深的影响较小，q 值在所有因子中最低，仅为 0.04($p<0.05$)。

2.4　坡面径流深的交互作用探测结果

研究区 15 个影响因子对径流深的交互作用探测结果如图 5 所示。各影响因子间的交互作用主要是非线性增强和双因子增强，占比分别为 65.04% 和 40.78%。非线性增强主要出现在降雨因子和非降雨因子的交互中，交互后影响力远大于单因子影响力；双因子增强主要出现在降雨因子间的交互中及非降雨因子间的交互中，交互后影响力略有提升。值得注意的是，虽然植被类型的单因子影响力较低，但它与其他因子间的交互作用大多为非线性增强。从交互作用强度上看，坡面径流深影响因子间交互作用 q 值排名前 4 位的因子组合分别为砾石覆盖度 $\cap I_{30}$ (0.721 5)、砾石覆盖度 $\cap I_{60}$ (0.691 3)、砾石覆盖度 $\cap$ 降雨量(0.681 2)、植被盖度 $\cap I_{30}$ (0.650 4)，表明这些因子间的强烈交互作用主导了坡面产流。

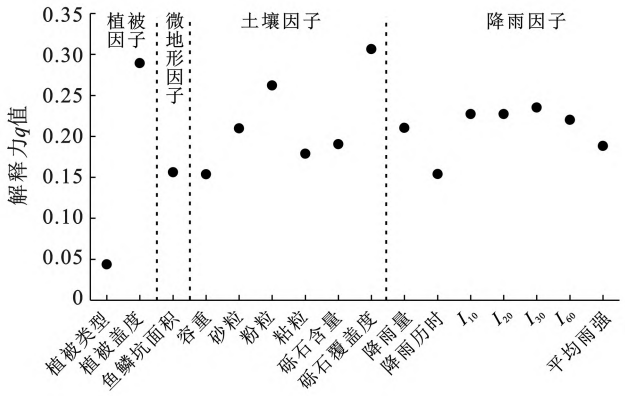


图 4　地理探测器对坡面径流深的因子探测结果

Fig.4　Factor detection results of Geodetector on runoff depth on slopes

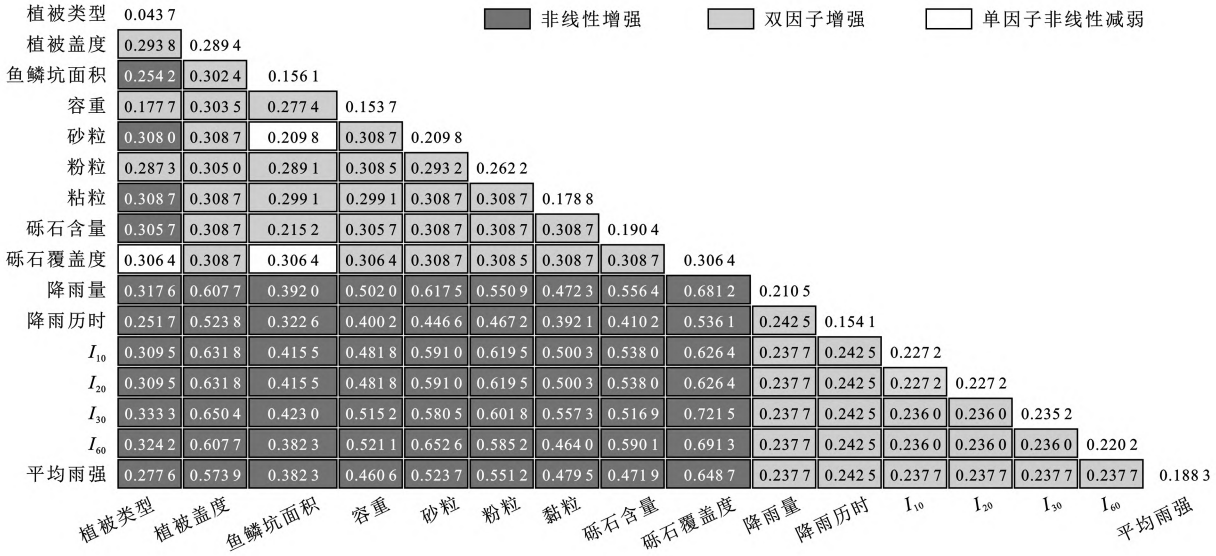


图 5　地理探测器对坡面径流深影响因子的交互作用探测结果

Fig.5　Interaction detection results of Geodetector on influencing factors of runoff depth on slopes

3　讨 论

3.1　植被因子对坡面产流的影响

大量研究表明，坡面径流受到植被盖度的调节：更大的植被盖度产生更多的冠层拦截[22]，更大的渗透[25]以及较小的径流量[26]。本研究证明了这一观点，因子探测结果表明(图 4)，与植被类型相比，植被盖度更能体现植被因子对坡面产流的控制作用。从水文角度来看，植被冠层通过截流和吸收雨滴的动能来削弱坡面径流[27]，因此，与单物种群落相比，具有多层结构的植被群落在减少坡面径流方面具有优势[28]。本研究中自然荒坡乔木群落具有较高的植被盖度，导致其产生的径流深显著小于灌木群落和草本群落；由于缺少林下植被，鱼鳞坑坡乔木群落与另外两种植被群落的植被盖度相差不大，导致 3 种植被群落产生的径流深并无显著区别。因此，增加植被盖度

以及合理配置植被类型是该地区控制水土流失的有效手段。对于同一植被群落,不同降雨事件产生的径流深变化较大,表明坡面径流深不仅受到植被因子的影响,还受到降雨事件特征(降雨量、降雨强度等)的影响,导致坡面径流深具有高度的异质性[29]。

3.2 微地形因子对坡面产流的影响

作为一种重要的水土流失治理措施,鱼鳞坑工程的实施可有效减少坡面产流量[30]。本研究发现,与未实施鱼鳞坑工程的自然荒坡相比,鱼鳞坑坡草本群落、灌木群落、乔木群落的平均径流深分别减少了56.61%,72.80%和39.58%,这与赵世伟等[31]的研究结果一致。这是因为鱼鳞坑工程改变了坡面微地形,形成了一种洼地。一方面,洼地起着截留降雨的直接作用和增加入渗能力的间接作用,在一定程度上阻断径流,延缓产流过程[13];另一方面,洼地的持水保肥作用促进植物生长,植物生长引起的盖度变化及土壤性质改善又会起到消减径流的作用[32-33]。

3.3 砾石对坡面产流的影响

太行山南麓坡面产流单因子影响力从强到弱排序为:土壤因子>降雨因子>植被因子>微地形因子。土壤是解释力最高的因子,可能是因为大量存在的砾石导致了该地区土壤性质具有高度的空间变异性[34]。砾石覆盖度和砾石含量的因子探测 q 值分别达到了0.31和0.19,表明砾石对研究区的坡面产流有着重要影响。与景民晓等[35]以及Chow等[36]的研究结果相似,本研究中径流深随砾石含量的增加而减小,出现这一现象的原因可能是因为砾石增加了土壤基质中的裂缝,使得土体中连通的大孔隙结构开始逐步形成,水分能够快速向下移动,形成优先流和壤中流,导致坡面产流减少。在本研究中砾石覆盖度对径流深的控制作用有一个阈值,即在砾石覆盖度达到6%~9%之前,径流深随着砾石覆盖度的增加而减少;砾石覆盖度超过6%~9%则相反。先前的研究表明,砾石覆盖度通过促进土壤孔隙发育进而增加土壤入渗速率,减少坡面产流,其机理是土层表面的砾石改变了土壤环境、土壤微生物活动和菌落组成,进而改变土壤孔隙结构。当砾石覆盖度过高时,土壤表面过水断面减小[37-38]、砾石与土壤基质相互作用形成的结皮导致入渗性能降低,坡面径流量显著增加[39],此时坡面径流与砾石覆盖度与正相关。土壤容重反映土壤的紧实程度,容重小的土壤孔隙较多,入渗能力较强,产流较少。土壤机械组成通过改变土壤内摩擦角和黏聚力,控制着土壤的入渗能力,从而影响坡面产流过程[15]。

3.4 不同因子之间的交互作用

坡面产流是一个复杂的耦合过程,在一定区域内受到多种因素的共同作用。在各驱动因子的交互作用中,砾石覆盖度和雨强的交互作用得到了最高的 q 值,再次印证了砾石覆盖度和雨强对研究区坡面产流的主导作用。研究期间降雨量少雨强高的降雨事件会引起较大的径流深,这可能是研究区表层覆盖有砾石的土壤在高雨强降雨下易形成地表结皮和密封,从而降低入渗速率,增加地表径流量。降雨因子与植被、土壤及地形因子的交互作用远远大于单个因子的影响力,表明降雨因子是该地区水土流失的关键因素[40]。此外,2021年河南省发生了"7·20"极端降雨天气,导致研究区2021年降雨量显著高于多年平均降雨量。因此,未来的工作需要增加径流监测时间,以完善研究区不同丰水年和枯水年的径流特征,为太行山南麓水土流失治理及生态环境保护提供科学依据。

4 结论

(1) 鱼鳞坑坡的平均径流深表现为:草本群落(1.12 mm)>灌木群落(0.78 mm)>乔木群落(0.63 mm),自然荒坡的平均径流深表现为:灌木群落(2.86 mm)>草本群落(2.58 mm)>乔木群落(1.05 mm);对比自然荒坡,鱼鳞坑工程改变了坡面微地形,有效减少了坡面径流。

(2) 太行山南麓坡面产流单因子影响力从强到弱排序为:土壤因子>降雨因子>植被因子>微地形因子。与植被类型相比,植被盖度更能体现太行山南麓植被因子对坡面产流的控制作用;大量砾石的存在导致了该区域坡面产流过程的复杂性。

(3) 坡面产流影响因子交互作用后大多表现为非线性增强和双因子增强作用;降雨因子与非降雨因子交互后均表现为非线性增强作用,表明降雨因子仍是该地区水土流失的关键因素。

参考文献(References)

[1] Liang Xinlan, Feng Jiawei, Ye Zhixin, et al. The effect of soil surface mounds and depressions on runoff [J]. Sustainability, 2022,15(1):175.

[2] Yu Yang, Wei Wei, Chen Liding, et al. Quantifying the effects of precipitation, vegetation, and land preparation techniques on runoff and soil erosion in a loess watershed of China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 652:755-764.

[3] 樊登星,余新晓,贾国栋,等.密云水库上游不同土地利用方式下的土壤侵蚀特征[J].水土保持通报,2015,35(1):

5-8,255.
Fan Dengxing, Yu Xinxiao, Jia Guodong, et al. Characteristics of soil erosion under different landuse types in upper area of Miyun Reservoir [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(1):5-8,255.

[4] Hou Guirong, Bi Huaxing, Huo Yunmei, et al. Determining the optimal vegetation coverage for controlling soil erosion in *Cynodon dactylon* grassland in North China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,244:118771.

[5] Wu Bingchen, Qi Shi. Effects of underlay on hill-slope surface runoff process of *Cupressus funebris* Endl. plantations in Southwestern China [J]. Forests, 2021,12(5):644.

[6] 林锦阔,李子君,许海超,等.降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响[J].水土保持通报,2016,36(5):7-12,9.
Lin Jinkuo, Li Zijun, Xu Haichao, et al. Effects of rainfall factors on runoff and sediment yield of runoff plots with different land use patterns in Yimeng Mountainous Area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(5):7-12,9.

[7] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):58-63.
Chang Songtao, Huang Shaoyan, Zha Xuan, et al. Effects of rainfall intensity and vegetation coverage on runoff and sediment yield on red soil slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(3):58-63.

[8] 刘志伟,李胜男,郭燕红,等.青藏高原色林错流域高寒草原坡面产流特征及其影响因素[J].生态学杂志,2021,40(8):2388-2399.
Liu Zhiwei, Li Shengnan, Guo Yanhong, et al. Characteristics of hillslope runoff generation and its controlling factors on an alpine grassland in the SilinCo basin of the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(8):2388-2399.

[9] Mohammad A G, Adam M A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses [J]. Catena, 2010,81(2):97-103.

[10] Duan Liangxia, Huang Mingbin, Zhang Luodan. Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2016,537:356-366.

[11] Wei Wei, Chen Liding, Fu Bojie, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China [J]. Journal of Hydrology, 2007,335(3/4):247-258.

[12] Feng Qiang, Zhao Wenwu, Wang Jun, et al. Effects of different land-use types on soil erosion under natural rainfall in the Loess Plateau, China [J]. Pedosphere, 2016,26(2):243-256.

[13] Liang Xinlan, Feng Jiawei, Ye Zhixin, et al. The effect of soil surface mounds and depressions on runoff [J]. Sustainability, 2022,15(1):175.

[14] 杨娅双,王金满,万德鹏.人工堆垫地貌微地形改造及其水土保持效果研究进展[J].生态学杂志,2018,37(2):569-579.
Yang Yashuang, Wang Jinman, Wan Depeng. Microtopography modification and its effects on the conservation of soil and water in artificially piled landform area: A review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018,37(2):569-579.

[15] 徐铭泽,杨洁,刘窑军,等.不同母质红壤坡面产流产沙特征比较[J].水土保持学报,2018,32(2):34-39.
Xu Mingze, Yang Jie, Liu Yaojun, et al. The characteristics of runoff and sediment yield of red soil slope with different parent materials [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(2):34-39.

[16] 郑腾辉,周旺,刘涛,等.连续模拟降雨下岩溶区含砾石堆积体坡面径流产沙特征[J].水土保持学报,2020,34(3):55-60.
Zheng Tenghui, Zhou Wang, Liu Tao, et al. Characteristics sediment yield and runoff on the slope surface of gravel accumulation in karst area under continuous simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(3):55-60.

[17] 王林华,汪亚峰,王健,等.地表粗糙度对黄土坡面产流机制的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):120-128.
Wang Linhua, Wang Yafeng, Wang Jian, et al. Effects of soil surface roughness on runoff generation mechanism on loess slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 120-128.

[18] 赖承义,左舒翟,任引.不同生态修复措施和环境因素对亚热带红壤区针叶纯林坡面水土保持功能的影响[J].生态学报,2021,41(12):4913-4922.
Lai Chengyi, Zuo Shudi, Ren Yin. Impacts of different ecological restoration measures and environmental factors on water and soil conservation of the slope in the pure coniferous forest of the subtropical red soil area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(12):4913-4922.

[19] 朱燕琴,赵志斌,齐广平,等.黄土丘陵沟壑区不同植被类型次降雨产流产沙特征[J].草地学报,2019,27(1):28-34.
Zhu Yanqin, Zhao Zhibin, Qi Guangping, et al. Characteristics of slope runoff and sediment of different vegetation types under individual rainfall events in loess hilly and gully region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(1):28-34.

[20] 罗娅,杨胜天,刘晓燕,等.孤山川流域1980s以来次降雨—产流—产沙变化[J].水土保持通报,2015,35(3):23-29.
Luo Ya, Yang Shengtian, Liu Xiaoyan, et al. Variations of rainfall, runoff and sediment yield in Gushanchuan River basin since 1980s [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(3):23-29.

[21] 冯雪瑾,张志华,杨喜田,等.太行山低山丘陵区人工林表层土壤有机碳和全氮分布特征[J].应用生态学报,2019,30(2):511-517.
Feng Xuejin, Zhang Zhihua, Yang Xitian, et al. Distribution characteristics of surface soil organic carbon and total nitrogen in forest plantation of hilly area of Taihang Mountains, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019,30(2):511-517.

[22] Zhu Yuanjun, Shao Mingan. Spatial distribution of surface rock fragment on hill-slopes in a small catchment in wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2008,51(6):862-870.

[23] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.

[24] 王永武,朱青,赖晓明,等.土壤水文过程对土壤砾石的响应:全球Meta分析[J].中国科学:地球科学,2023,53(9):2094-109.
Wang Yongwu, Zhu Qing, Lai Xiaoming, et al. Response of soil hydrological processes to soil rock fragments: A global Meta-analysis [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2003,66(9):2066-2080.

[25] Puigdef ábregas J. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2005,30(2):133-147.

[26] Tang Chongjun, Liu Yu, Li Zhongwu, et al. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, Southern China [J]. Ecological Indicators, 2021,129:107956.

[27] Chen Hao, Zhang Xiaoping, Abla M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2018,170:141-149.

[28] Buda A R, Kleinman P J A, Srinivasan M S, et al. Factors influencing surface runoff generation from two agricultural hillslopes in Central Pennsylvania [J]. Hydrological Processes, 2009,23(9):1295-1312.

[29] 黄凯,刘瑞禄,覃莉,等.不同降雨条件下坡长对喀斯特坡面土壤侵蚀的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):271-280.
Huang Kai, Liu Ruilu, Qin Li, et al. Effects of slope length on soil erosion of karst slope under different rainfall conditions [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(1):271-280.

[30] 郑子成,何淑勤,吴发启,等.降雨条件下地表糙度对片蚀的影响及其变化[J].农业工程学报,2010,26(增刊1):139-145.
Zheng Zicheng, He Shuqin, Wu Faqi. Effects of soil surface roughness on sheet erosion and change under different rainfall conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010,26(Suppl.1):139-145.

[31] 赵世伟,刘娜娜,苏静,等.黄土高原水土保持措施对侵蚀土壤发育的效应[J].中国水土保持科学,2006,4(6):5-12.
Zhao Shiwei, Liu Nana, Su Jing, et al. Effects of soil and water conservation measures on eroded soil development in the Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006,4(6):5-12.

[32] 于洋,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区小流域典型造林整地工程土壤水分特征曲线模拟[J].生态学报,2018,38(18):6511-6520.
Yu Yang, Wei Wei, Chen Liding, et al. Simulation of a soil water retention curve of typical soil and water conservation engineering measures in the loess hilly watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(18):6511-6520.

[33] 卫伟,余韵,贾福岩,等.微地形改造的生态环境效应研究进展[J].生态学报,2013,33(20):6462-6469.
Wei Wei, Yu Yun, Jia Fuyan, et al. Research progress in the ecological effects of micro-landform modification [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(20):6462-6469.

[34] 张志华,张锦豪,桑玉强,等.太行山南麓坡面土壤碳氮空间变异性及其影响因素[J].应用生态学报,2021,32(8):2829-2938.
Zhang Zhihua, Zhang Jinhao, Sang Yuqiang, et al. Spatial variations and its influencing factors of soil carbon and nitrogen on the southern foot of Taihang Mountains, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(8):2829-2838.

[35] 景民晓,谢永生,李文华,等.不同土石比例弃土堆置体产流产沙模拟研究[J].水土保持学报,2014,28(3):78-82.
Jing Minxiao, Xie Yongsheng, Li Wenhua, et al. Runoff and sediment yield modeling of spoilbank with different soil-stone ratio [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(3):78-82.

(下转第276页)

38(3):176-184.

[29] 王冬梦.基于空间优先级的郑州市绿色基础设施网络分析与优化研究[D].河南 郑州:河南农业大学,2023.
Wang Dongmeng. Analysis and optimization of green infrastructure network in Zhengzhou based on spatial priority [D]. Zhengzhou, Henan: Henan Agricultural University, 2023.

[30] 霍锦庚,时振钦,朱文博,等.郑州大都市区生态网络构建及格局优化[J].应用生态学报,2023,34(3):742-750.
Huo Jingeng, Shi Zhenqin, Zhu Wenbo, et al. Construction and pattern optimization of ecological network in Zhengzhou metropolitan area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(3):742-750.

[31] 刘曼舒.国土空间规划背景下郑州市城市增长边界划定[D].河南 郑州:河南农业大学,2020.
Liu Manshu. Delineation of urban growth boundaries in Zhengzhou under the background of national spatial planning [D]. Zhengzhou, Henan: Henan Agricultural University, 2020.

[32] 韦宝婧,苏杰,胡希军,等.基于"HY-LM"的生态廊道与生态节点综合识别研究[J].生态学报,2022,42(7):2995-3009.
Wei Baojing, Su Jie, Hu Xijun, et al. Comprehensive identification of eco-corridors and eco-nodes based on principle of hydrological analysis and Linkage Mapper [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(7):2995-3009.

[33] 覃彬桂,林伊琳,赵俊三,等.基于InVEST模型和电路理论的昆明市国土空间生态修复关键区域识别[J].中国环境科学,2023,43(2):809-820.
Qin Bingui, Lin Yilin, Zhao Junsan, et al. Identification of key areas for the ecological restoration of territorial space in Kunming based on the InVEST model and circuit theory [J]. China Environmental Science, 2023,43(2):809-820.

[34] 吴映梅,李琛,高彬嫔,等.高原湖泊城市生态安全格局构建:以大理市为例[J].生态学报,2023,43(19):8153-8166.
Wu Yingmei, Li Chen, Gao Binpin, et al. Construction of urban ecological security pattern in highland lakes cites: The case of Dali City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(19):8153-8166.

[35] 宋利利,秦明周.整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J].应用生态学报,2016,27(10):3344-3352.
Song Lili, Qin Mingzhou. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(10):3344-3352.

(上接第49页)

[17] 王海峰,吴永祥,丁新建,等.风沙环境下高速公路路基风压及沙粒沉积分析研究[J].科技风,2022(31):70-72.
Wang Haifeng, Wu Yongxiang, Ding Xinjian, et al. Highway roadbed sand environment wind and sand deposition analysis research [J]. Technology Wind, 2022(31):70-72.

[18] 江兴旺,张婷,王琳,等.沙漠戈壁地区高等级公路风沙防治研究[J].公路,2015,60(4):251-254.
Jiang Xingwang, Zhang Ting, Wang Lin, et al. Study on the prevention and control of wind-blown sand in high-grade highways in desert Gobi area [J]. Highway, 2015,60(4):251-254.

[19] 袁媛,刘宽河.沙害对公路路基高度的影响[J].内蒙古公路与运输,2004(3):1-4.
Yuan Yuan, Liu Kuanhe. Effect of sand damage on the height of highway subgrade [J]. Highways and Transportation in Inner Mongolia, 2004(3):1-4.

(上接第118页)

[36] Chow T L, Rees H W. Effects of coarse-fragment content and size on soil erosion under simulated rainfall [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1995,75(2):227-232.

[37] Sekucia F, Dlapa P, Kollár J, et al. Land-use impact on porosity and water retention of soils rich in rock fragments [J]. Catena, 2020,195:104807.

[38] Hlaváéiková H, Novák V, Holko L. On the role of rock fragments and initial soil water content in the potential subsurface runoff formation [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2015,63(1):71-81.

[39] Poesen J, De Luna E, Franca A, et al. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content [J]. Catena, 1999,36(4):315-329.

[40] 宋月君,黄炎和,杨洁,等.赣中第四纪红壤区马尾松林下水土流失特征及防治成效分析[J].干旱区资源与环境,2018,32(4):119-125.
Song Yuejun, Huang Yanhe, Yang Jie, et al. The characteristics of soil and water loss in *Pinus massoniana* forest in red soil region of Jiangxi Province and the effect of soil and water conservation [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018,32(4):119-125.