

基于小区观测的坡改梯工程水保效应机理研究

贺军¹, 刘卫敏², 南宏伟², 朱丙轩², 储泽毅²

(1.山西水利建设开发咨询有限公司, 山西 太原 030001; 2.山西农业大学 林学院, 山西 晋中 030801)

摘要: [目的] 系统分析坡改梯工程中坡度、植被这两大核心要素的水保效应机理, 为多指标机理研究提供可借鉴的具体方法, 补充完善水保工程生态效应理论, 为生态文明建设实践提供理论指导。[方法] 从坡改梯工程两大核心要素(坡度、植被)出发, 综合运用多种数学模型对其水保效应机理进行深度剖析。[结果] ①基于线性模型, 实现全文 5 个指标总水保效应在同一时空条件下的线性分解, 进而依据各组分相对贡献率的精确计算, 首次真正从完整理论意义上揭示坡改梯工程水保效应产生的真实根源。②基于多重回归分析, 从大量备选模型中筛选最优数学模型, 深刻揭示上述各组分水保效应的具体影响因素及其作用机制。③基于结构方程模型(SEM), 验证了含物理因子、化学因子两个潜变量在内的具体理论模型作为全文 5 个指标水保效应本质反映的合理性。通过 SEM 群组分析, 同时拟合了两种坡度条件下的预设模型, 清晰直观地展示出各因素间的内在联系, 及不同坡度条件下水保效应机理的差异性规律。④基于主成分分析原理, 构建包含 5 个原始变量 80.8%信息的综合性因子, 将评价指标由五维转变为一维, 实现水保效应的整体性综合定量评价。[结论] 基于高阶数据分析方法可实现多因素水保效应机理研究结论的深度整合, 加深人们对其具体机理的认识, 亦可为多指标机理研究提供方法论参考, 有助于构建更高预测精度的专业数学模型, 提升水土流失治理实践的效率。

关键词: 坡改梯; 植被; 坡度; 交互作用; 水土保持效应; 结构方程模型; 线性模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0032-12

中图分类号: P334⁺.91, P333.5

文献参数: 贺军, 刘卫敏, 南宏伟, 等. 基于小区观测的坡改梯工程水保效应机理研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 32-43. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.005; He Jun, Liu Weimin, Nan Hongwei, et al. A study on effect mechanism of soil and water conservation of slope-to-terrace engineering based on runoff plots [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 32-43.

A Study on Effect Mechanism of Soil and Water Conservation of Slope-to-terrace Engineering Based on Runoff Plots

He Jun¹, Liu Weimin², Nan Hongwei², Zhu Bingxuan², Chu Zeyi²

(1. Shanxi Water Conservancy Construction Development and Consulting Corporation, Taiyuan, Shanxi 030001, China; 2. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi 030801, China)

Abstract: [Objective] The soil and water conservation effect mechanism of the two core elements (slope and vegetation) in a slope-to-terrace project were systematically analyzed to provide specific methods for multi-index mechanism research, to supplement and improve the ecological effect theory of water conservation projects, and to provide theoretical guidance for the practice of ecological civilization construction. [Methods] Slope and vegetation factors were comprehensively considered, and a variety of mathematical models were used to deeply analyze their water conservation effect mechanisms. [Results] ① Based on a linear model, the linear component decomposition of the total soil and water conservation effect of the five indicators in the full text under the same spatiotemporal conditions was realized. Furthermore, based on the precise calculation of the relative contribution rate of each component, the real source of the soil and water conservation effect of the slope-to-terrace project was revealed for the first time in a theoretical sense. ② Based on multiple regression

收稿日期: 2022-06-16

修回日期: 2022-08-02

资助项目: 山西省水利科学技术研究与推广项目“水土保持措施体系与河流水环境的响应关系研究: 以梯田治理体系为例”(SZ-2020-22)

第一作者: 贺军(1981—), 男(汉族), 山西省忻州市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。Email: hjsxty0310@126.com。

通信作者: 南宏伟(1978—), 男(汉族), 山西省晋中市人, 博士, 副教授, 主要从事生态学方面的研究。Email: nanhw@sxau.edu.cn。

analysis, the optimal mathematical model was selected from a large number of alternative models, and the specific influencing factors and mechanism of the soil and water conservation effect of the above components were profoundly revealed. ③ Based on structural equation modeling (SEM), the rationality of the specific theoretical model including two latent variables (physical factor and chemical factor) reflecting the soil and water conservation effect of the five indicators in the full text was verified. By SEM group analysis, the preset models under the two slope conditions were fitted at the same time, clearly and intuitively showing the internal relationship between the factors and the differences in the mechanisms of the soil and water conservation effect under different slope conditions. ④ Based on principle component analysis, a comprehensive factor containing 80.8% of the information of five original variables was constructed, and the evaluation index was changed from five dimensions to one dimension, so as to realize the overall comprehensive quantitative evaluation of soil and water conservation effects. [Conclusion] Based on advanced data analysis methods, deep integration of research conclusions on the mechanism of the multi-factor soil and water conservation effect can be achieved, which deepens people's understanding of its specific mechanism. It can also provide a methodological reference for the research of multi-index mechanisms, help to build professional mathematical models with higher predictive accuracy, and improve the efficiency of soil and water conservation practice.

Keywords: slope-to-terrace engineering; vegetation; slope; interaction; soil and water conservation effect; structural equation modeling; linear model

坡耕地是中国水土流失的重要策源地,其综合治理事关国家战略安全,是生态文明建设成败的关键所在。作为当前共识,坡改梯工程已成为中国区域内 25° 以下坡耕地水土流失治理的主要措施^[1]。通过微地形改造,结合适当植被措施,跑水、跑土、跑肥的坡耕地可被有效转变为“三保田”;大量实践证明,坡改梯工程可有力促进农业生产,增加农民收入,发挥显著的社会效益^[2]。坡改梯工程具有显著的减流、减沙及减少土壤养分流失等水保效应;其水保效应发生机理的研究主要涉及微地形、地貌的重塑^[3-5],水文过程的变化^[6-8]以及植被因子的贡献等^[9-11]方面。Tarolli^[12]综述相关研究,指出其主要机制:消减坡度,增加土壤对水的渗透作用,配合植被措施,从而改良土壤结构,减缓水土流失。迄今为止,人们对坡改梯工程水保效应发生机理的认识仍相当有限,总体上仍处于定性描述及半定量研究阶段^[13]。

就平均意义而言,结合田间管理措施,坡改梯工程可减少产流量 41.9%,产沙量 52%,同时增加土壤含水率 12.9%^[14];其内在机制的两大要素(坡度、植被),对上述水保效应贡献大小的准确衡量、二者相对重要性的比较及其具体影响因素与机制等一系列相互关联的理论问题是坡改梯工程水土保持效应机理研究的重要基石。前人倾向于分别单独分析坡度^[15]或植被^[16-17]因素的水保效应,即使同时联合考虑二者,又全部或部分忽略了二者的交互作用^[18],不但降低了研究结论的精度,而且由于没有实现在相同条件下的联合分析,也就无法对二者的相对重要性进行比较,并由此进一步影响到以此为出发点的水保效应机

理后续研究。再者,当机理研究同时涉及太多因素时,必然导致结果的复杂性,如无恰当的数据分析方法支撑,将难以实现研究结论的深度整合,而多因素联合分析已是今后各学科理论探讨深入发展的必然趋势^[19]。此外,在生态治理措施水保效应的评价排序研究中,传统方法是每次依据一个指标进行单变量分析,然后逐一完成其他指标的分析,最终结合实践经验得出总的排序结果,因而其结论仍然含有一定的主观性成分^[9,15]。合理使用数学模型有助于克服上述诸多不足,提升相关理论研究的精确度。

山西省静乐县娑婆河小流域地处汾河上游,属典型的黄土丘陵水土流失区。本研究综合考虑坡改梯工程两大核心要素(坡度、植被),设立野外径流小区,监测试验地雨季主要降雨事件,对产流、产沙量进行定量分析,旨在基于数学模型从坡改梯工程两大核心要素角度系统探究其水保效应机理。①在多角度、多层次评价坡改梯工程水保效应的基础上;②基于线性模型,实现全文 5 个指标总水保效应在同一时空条件下的线性组分分解,从而揭示坡改梯工程水保效应产生的真实根源;③分析上述线性组分降雨特性间的关系,探究其具体影响因素及机制;④结合结构方程模型等多元统计分析方法,深度揭示其水保效应机理;⑤构建包含多个指标信息的综合客观因子,据此实现水保治理措施效应的整体性综合定量评价,提升排序结果的客观性与可靠性。本研究旨在为多指标机理研究提供可借鉴的具体方法,补充完善水保工程生态效应理论,并有助于构建更高预测精度的专业数学模型,为生态文明建设实践提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究试验地位于山西省忻州市静乐县娑婆乡娑婆村,地理位置为东经 $122^{\circ}19'16''$,北纬 $38^{\circ}41'33''$,海拔 1 555 m。境内群山环绕,丘陵密布,沟壑相间,整体地形呈北高南低之势,属典型的土石山区,平均土壤侵蚀模数为 $5\ 800\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[20]。该区属温带大陆性气候,四季分明,冬冷夏热,昼夜温差大。年平均气温 $3.5\sim 6.8\ ^{\circ}\text{C}$,1 月均温 $-13\ ^{\circ}\text{C}$,7 月均温 $19\ ^{\circ}\text{C}$,无霜期 $100\sim 130\ \text{d}$,年降雨量 $300\sim 450\ \text{mm}$,主要集中在 7—9 月^[21]。土壤类型为栗褐土,土层深厚。该区现有耕地 $1\ 866.67\ \text{hm}^2$,其中坡耕地占比达 75% 以上。耕作层土壤全氮含量 $0.31\ \text{g}/\text{kg}$,速效磷含量 $4.9\ \text{mg}/\text{kg}$,速效钾含量 $113\ \text{mg}/\text{kg}$,有机质含量 $6\ \text{g}/\text{kg}$ 。该区主要乔木树种为油松 (*Pinus tabulaeformis*)、垂柳 (*Salix babylonica*) 和白杨 (*Populus tomentosa*),主要灌木种类为沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、黄刺玫 (*Rosa xanthina*) 及毛榛 (*Corylus mandshurica*),草本包含狗尾草 (*Setaria viridis*)、白草 (*Pennisetum centrasiaticum*)、猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*) 等^[22]。

1.2 试验设计

本研究采用完全随机化试验设计,共包含坡度和植被两个因素,其中前者设计 0° 和 25° 两个水平,后者设计草本盖度 0% 和草本盖度 80% 两个水平,合计 4 种试验处理组合,即坡度 0° +草本盖度 0% ,坡度 0° +草本盖度 80% ,坡度 25° +草本盖度 0% 及坡度 25° +草本盖度 80% ,各处理重复两次。试验期为 2020 年 7—9 月。

据上述原则,结合实际地形情况,共设立 $2.5\ \text{m} \times 5\ \text{m}$ 的野外径流小区 8 个。PVC 挡板埋深 20 cm,地表裸露 $20\ \text{cm}$ ^[23]。地表径流通过水泥导流槽,经 PVC 管汇入聚氯乙烯集流桶 ($\Phi=50\ \text{cm}$) 中^[24]。同时,于各小区外缘设置深 15 cm 的排水沟渠。草本种类为当地原生植被狗尾草和猪毛蒿。无植被处理定期进行除草维护,以确保试验期间其植被盖度为零。除草时仅作草本地表部分剪除,以免扰动地表土壤。此外,为模拟农田环境,结合当地生产实际,以 $20\ \text{g}/\text{m}^2$ 标准对全部试验处理进行均匀施肥处理(史丹利通用型复合肥,氮:磷:钾比例为 15:15:15)。于径流场地附近设立自动气象站(JXBS-3 001-QXZ,威海精讯畅通电子科技有限公司,数据采集周期 255 s),用于记录实时气象数据。

1.3 样品采集

待每次降雨结束后,及时计量、录入各径流小区的总径流量。将集流桶中水土混合液充分搅匀后,取 500 ml 左右样品两份,带回实验室备用。同时,完成导流槽和集流桶的彻底清洗。样品含沙浓度则采用烘干法测定^[25]。样品含磷酸盐、亚硝酸盐及氨氮浓度则采用奥克丹 W-I 型水质参数分析仪测定。

1.4 指标测定及计算

$$\text{单位面积产流量}(\text{ml}/\text{m}^2) = \frac{\text{总径流量}(\text{ml})}{2.5\ \text{m} \times 5\ \text{m}} \quad (1)$$

$$\text{单位面积产沙量}(\text{g}/\text{m}^2) = \frac{\text{总产沙量}(\text{g})}{2.5\ \text{m} \times 5\ \text{m}} \quad (2)$$

$$\text{总产沙量}(\text{g}) = \text{样品含沙浓度}(\text{g}/\text{ml}) \times \text{总径流量}(\text{ml}) \quad (3)$$

$$\text{单位面积磷酸盐流失量}(\text{mg}/\text{m}^2) = \frac{\text{总磷酸盐流失量}(\text{mg})}{2.5\ \text{m} \times 5\ \text{m}} \quad (4)$$

$$\text{总磷酸盐流失量}(\text{mg}) = \text{样品含磷酸盐浓度}(\text{mg}/\text{ml}) \times \text{总径流量}(\text{ml}) \quad (5)$$

$$\text{单位面积亚硝酸盐流失量}(\text{mg}/\text{m}^2) = \frac{\text{总亚硝酸盐流失量}(\text{mg})}{2.5\ \text{m} \times 5\ \text{m}} \quad (6)$$

$$\text{总亚硝酸盐流失量}(\text{mg}) = \text{样品含亚硝酸盐浓度}(\text{mg}/\text{ml}) \times \text{总径流量}(\text{ml}) \quad (7)$$

$$\text{单位面积氨氮流失量}(\text{mg}/\text{m}^2) = \frac{\text{总氨氮流失量}(\text{mg})}{2.5\ \text{m} \times 5\ \text{m}} \quad (8)$$

$$\text{总氨氮流失量}(\text{mg}) = \text{样品含氨氮浓度}(\text{mg}/\text{ml}) \times \text{总径流量}(\text{ml}) \quad (9)$$

将自动气象站原始数据导出,利用 Excel 软件汇总并计算降雨历时(h)、降雨量(mm)、平均雨强(mm/h)、最大 30 min 降雨强度 I_{30} (mm/h) 等指标。降雨侵蚀力的计算参见章文波等^[26]的方法。最小降雨间歇为 6 h,以此确定次降雨事件的结束点^[27]。

$$\begin{aligned} \text{某试验处理减流效益} = & \frac{(\text{对照试验处理的产流量} - \text{相应试验处理的产流量})}{\text{对照试验处理的产流量} \times 100\%} \times 100\% \quad (10) \end{aligned}$$

某试验处理对应的土沙、磷酸盐、亚硝酸盐及氨氮等指标削减效益均采用上述公式计算。

1.5 统计分析

1.5.1 坡度、植被因素主效应及二者的交互效应

(1) 数学模型。

$$\gamma_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha_i\beta_j + \epsilon_{ijk} \quad (11)$$

$$(i, j = 0, 1; k = 1, 2)$$

式中: γ_{ijk} 为试验具体观测值; μ 为参照水平,本研究

设定坡度 0° + 草本盖度 80% 试验处理为参照水平; α_i 为坡度因素 i 水平下的主效应; β_j 为植被因素 j 水平下的主效应; α_i, β_j 为上述因素 i, j 水平下交互作用的效应值; ϵ_{ijk} 为随机因素效应值。

(2) 效应值的具体含义。同参照水平相比, 相应组分 ($\alpha_i, \beta_j, \alpha_i\beta_j$) 对因变量贡献的增加或者减小量。

(3) 各组分效应值的估计。利用 SPSS 13.0 方差分析过程中的参数估计功能实现。

(4) 各组分水保效应的贡献率。模型中相应组分的效应值占三者总效应值的百分比。

(5) 各组分效应值同降雨特性间的关系。利用 SPSS 13.0 线性及非线性回归分析过程实现。

1.5.2 结构方程模型分析 结构方程模型 (structural equation model, SEM) 融合了传统回归分析和因子分析的统计技术, 从变量的协方差矩阵出发来探究多个变量间的关系, 是多元数据分析的强大工具。它不仅可以分析变量的主效应, 而且可以深入分析这些变量间的交互效应, 不但可以同时处理多个因变量, 而且可以比较、评价不同的理论模型。由于 SEM 可以将多个自变量、因变量同时纳入模型, 获取足量信息, 因而可以获得比传统统计分析更加全面、更具准确性的分析结果^[29]。

SEM 囊括了多种高级统计分析技术, 本研究采用其中的验证性因子分析来探究坡改梯工程的水保效应机理, 其逻辑思路为预先根据专业知识提出理论预设模型, 然后根据试验数据对模型进行拟合, 最终依据拟合指数来对模型的合理性进行判断。若拟合指数在合理范围内, 说明预设模型较好地适配试验数据, 据此可对变量间的本质关系进行深度揭示^[30]。

本研究利用 AMOS 22.0 软件进行结构方程模型分析。在 AMOS 中, 矩形框表示一个可观测变量, 而椭圆表示一个潜变量, 即无法直接用可观测的量化指标来衡量的变量, 单向箭头表示变量间的因果关系, 而双向箭头表示两个变量间的线性相关关系。根据专业知识, 产流量与产沙量二者间应存在中高度的线性相关性, 且其均属于水保效应的物理方面, 因此

可以从二者中提取一个共性的潜变量, 并命名为物理因子。基于相同考虑, 可从氨氮、硝酸盐和磷酸盐流失量三者中提取名为化学因子的潜变量, 且此二潜变量间存在一定的线性相关性。因此, 本研究构建的 SEM 预设模型参见图 2。

1.5.3 坡改梯工程水土保持效应的综合评价

(1) 综合评价指标的构建。以产流量、产沙量、氨氮、硝酸盐和磷酸盐流失量为基本因子, 进行 PCA (principal component analysis) 分析, 同时计算各样本的主成分因子得分。最终选取的主成分个数以主成分累积总方差贡献率大于 80% 为原则来确定。以所选取的主成分因子得分为基础, 以相应各主成分的总方差解释百分比为权重, 构建综合评价指标, 其表达式为: 第一主成分因子得分 \times 相应总方差贡献率 + 第二主成分因子得分 \times 相应总方差贡献率 +^[31]。因此, 所构建的综合评价指标已经包含了 5 个原始变量 80% 以上的信息, 但信息的维度已经由五维降至一维了, 极大地便利了后续的分析研究。

(2) 基于综合评价指标的水保效应差异显著性检验。以综合评价指标为因变量, 以坡度、植被为固定变量, 利用 SPSS 13.0 软件进行双因素方差分析, 多重比较采用 SNK 法。在进行方差分析之前, 将综合评价指标加上距离其最小值绝对值最近的某一正整数, 从而使全部数据转换为正数。如有必要, 继续对其进行对数转换以满足各处理方差齐性的要求。

全文制图采用 Microsoft Office Excel 2019 和 SigmaPlot 12.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 研究区试验期间的降雨特征

试验期间, 研究区共发生侵蚀性降雨 7 次, 其中 8 月 3 日降雨, 因道路毁损, 无法及时采样而放弃。本研究最终记录 6 场具有代表性的侵蚀性降雨, 其中小雨 2 场、中雨 3 场、大雨 1 场, 降雨量介于 5.5 ~ 34.2 mm 之间, 平均雨强介于 4.08 ~ 14.42 mm/h 之间, 已涵盖研究区典型降雨类型 (表 1)。

表 1 坡改梯工程研究区试验期间的降雨特征

Table 1 Rainfall characteristics during the experiment in the study area of slope-to-terrace engineering

降雨日期	降雨量/ mm	平均雨强/ (mm · h ⁻¹)	I_{30} / (mm · h ⁻¹)	降雨侵蚀力/ (MJ · mm · hm ⁻² · h ⁻¹)	降雨等级
0726	17.0	4.08	27.90	113.20	中雨
0801	18.6	14.42	31.82	148.45	中雨
0817	34.2	7.43	11.88	84.56	大雨
0824	8.2	12.71	15.91	30.39	小雨
0913	19.0	5.79	13.94	52.15	中雨
0923	5.5	4.74	7.42	7.56	小雨

2.2 坡度、植被因素水土保持效应的直观分析

植被盖度 80% 条件下坡度因素的水保效应是指同坡度 0°+ 草本盖度 80% 处理相比, 坡度 25°+ 草本盖度 80% 处理可以减少氨氮、亚硝酸盐、磷酸盐流失量的百分数以及相应的减沙和减流效应, 其分别为 36.22%, 42.90%, 42.71%, 70.64% 及 35.29%。其他亦作相同理解。表 2 说明, 有植被存在条件下坡度因

素的减沙效应和减流效应分别为 70.64%, 35.29%, 均高于无植被存在条件下的 66.32%, 34.31%, 因此坡改梯工程若能同时结合植物治理措施将有助于实现水保效应的最大化。而对于植被因素而言, 坡度 0° 条件下的总体水保效应要高于坡度 25° 条件下, 表明坡度因素可以影响植被因素的水保效应, 暗示二者可能存在显著的交互作用, 或者协同作用。

表 2 坡改梯工程坡度、植被因素的水土保持效应

Table 2 Soil and water conservation effects of slope and vegetation factors in slope-to-terrace engineering %

水土保持效应类型	氨 氮	亚硝酸盐	磷酸盐	减沙效应	减流效应
植被盖度 80% 条件下坡度因素的水保效应	36.22	42.90	42.71	70.64	35.29
植被盖度 0% 条件下坡度因素的水保效应	31.45	56.39	31.15	66.32	34.31
坡度 25° 条件下植被因素的水保效应	56.14	60.47	38.09	82.63	59.19
坡度 0° 条件下植被因素的水保效应	59.20	48.25	48.49	84.85	59.79

2.3 基于线性模型的坡度、植被因素及二者交互项水土保持效应分解

依据数学模型, 任一水保效应观测值均是由坡度因素主效应、植被因素主效应以及二者间交互效应等三部分线性相加而构成。例如在降雨量 19 mm、降雨侵蚀力 52.15 MJ·mm/(hm²·h) 条件下, 同坡度 0°+ 草本盖度 80% 试验处理相比, 坡度 25°+ 草本盖度 0% 处理会额外增加 2 147.2 ml/m² 的产流量, 其中坡度因素贡献了 501.6 ml/m² 的产流量, 植被因素贡献了 935.1 ml/m² 的产流量, 由于二者同时存在而产生的交互效应则贡献了 710.5 ml/m² 的产流量, 其相应贡献率分别为 23.36%, 43.55% 和 33.09%。因此, 基于线性数学模型进行的同一时空条件下的水保效应联合分析, 不仅可以定量评价各因素的主效应, 而且可以精确衡量因素间的交互效应, 并实现各组分贡献的相对重要性比较, 从而为深度揭示其具体机理提供了便利。

本研究水保效应的全部试验结果均可分解为上述 3 个组分的相应贡献之和, 没有出现任一组分效应值为 0 的情况, 且其相应贡献率复杂多变, 这一事实说明坡度、植被因素及二者交互项水土保持效应的普遍性和复杂性(图 1)。对于氨氮流失量、磷酸盐流失量及产流量而言, 植被因素的贡献居于主导地位, 而对于产沙量而言, 坡度与植被因素交互作用的贡献则远大于二者的主效应。因此, 尽管线性模型各组分的贡献率具有显著的不平衡性, 但其内在规律性的存在也是不容置疑的。

随着降雨量的增加, 氨氮流失量中坡度因素的贡

献率总体上呈现出先增加后降低的趋势, 而坡度同植被因素间交互作用的贡献率则表现出相反的趋势。产流量也具有类似规律, 但对产沙量而言, 坡度同植被因素间交互作用的贡献率始终居于主导地位, 而且对于降雨量的变化不甚敏感。而随着降雨侵蚀力的增加, 氨氮流失量中坡度因素的贡献率呈现出先增加后降低再增加的趋势, 坡度同植被因素间交互作用的贡献率在上升的总体趋势中呈现出了“双峰”现象。这种趋势也出现在了亚硝酸盐、磷酸盐流失量中坡度因素的贡献率上。对产沙量贡献最大的依然是坡度同植被间的交互作用, 二者的主效应反而贡献极低, 尤其是坡度因素, 而且这种规律不因降雨侵蚀力的改变而变化。

本研究在上述趋势分析的基础上, 进一步精确拟合了各水保效应值同降雨特性指标间的回归方程(表 3)。在全部的 15 个回归方程中, 有 12 个方程的 p 值 < 0.1, 其中 4 个方程的 p 值 > 0.05, 仅产沙量的植被因素主效应、植被 × 坡度交互效应, 以及产流量的植被因素主效应同降雨特性指标间尚无有效的回归方程。结果表明, 各水土保持效应的坡度、植被因素主效应及其交互效应同降雨特性指标间存在本质上的数学联系, 且这种联系不仅在多数情况下均为非线性的, 而且可由多个降雨特性指标同时进行刻画, 如硝酸盐流失量坡度因素主效应可由降雨特性的 4 个指标同时进行拟合, 获得了极佳的回归模型 ($R^2 = 0.99, p = 0.04$)。这些回归模型不仅量化了坡改梯工程中坡度、植被因素的水土保持效应, 而且深入揭示了其同降雨特性间的本质关系。

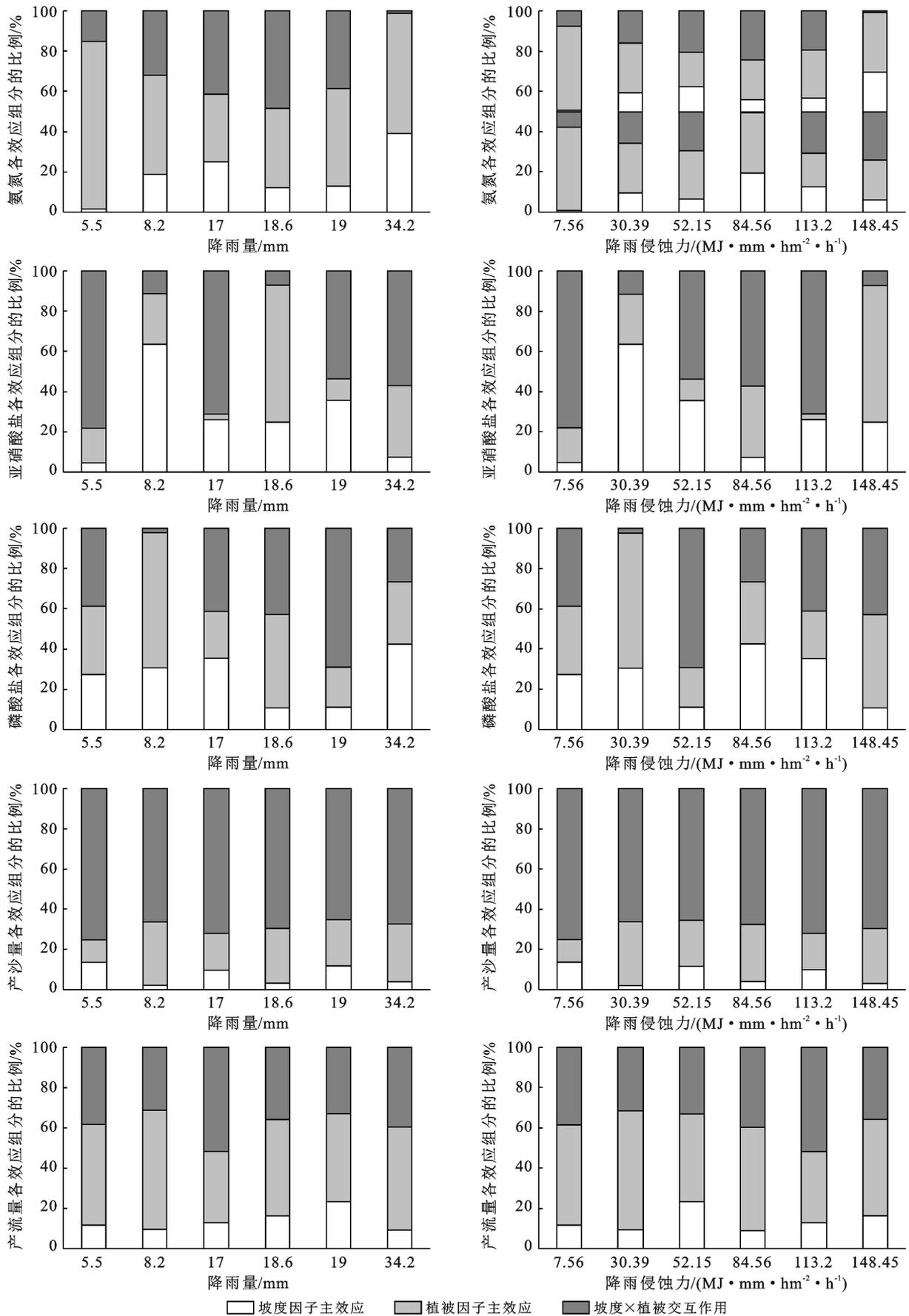


图 1 坡改梯工程线性模型中各组分的水土保持效应贡献率

Fig.1 Contribution rate of soil and water conservation effects of each component in the linear models of slope-to-terrace engineering

表 3 坡改梯工程坡度、植被因素及二者交互项水土保持效应同降雨特征间的关系
Table 3 The relationship between rainfall characteristics and soil and water conservation effects of slope, vegetation factors and their interactions in slope-to-terrace engineering

水保效应指标	数学模型分量	回归方程
磷酸盐	坡度因素主效应	$y=0.026+0.615/X_2$ ($R^2=0.71, p=0.07$)
	植被因素主效应	$y=0.22-\ln(X_2)$ ($R^2=0.91, p=0.01$)
	植被×坡度交互效应	$y=0.139\sim 1.453/X_1$ ($R^2=0.78, p=0.05$)
氨氮	坡度因素主效应	$y=\exp(-0.003\sim 36.324/X_2)$ ($R^2=0.86, p=0.02$)
	植被因素主效应	$y=-0.338+0.058 X_1-0.009 X_2+0.146 X_3$ ($R^2=0.95, p=0.08$)
	植被×坡度交互效应	$y=7 E-05 X_2^2-0.005 5 X_2+0.606 3$ ($R^2=0.90, p=0.07$)
亚硝酸盐	坡度因素主效应	$y=-0.321\sim 0.017 X_1-0.002 X_2+0.054 X_3+0.163 X_4$ ($R^2=0.99, p=0.04$)
	植被因素主效应	$y=0.001 X_1^2-0.027 X_1+0.211$ ($R^2=0.95, p=0.05$)
	植被×坡度交互效应	$y=0.001 2 X_1^2-0.029 8 X_1+0.255 4$ ($R^2=0.93, p=0.07$)
产沙量	坡度因素主效应	$y=-0.000 6 X_2^2+0.101 5 X_2+0.605$ ($R^2=0.99, p=0.02$)
	植被因素主效应	$y=\exp(3.202\sim 21.674 X_2)$ ($R^2=0.60, p=0.12$)
	植被×坡度交互效应	$y=-463.101+123.428 X_1-7.461 X_1^2+0.131 X_1^3$ ($R^3=0.69, p=0.11$)
产流量	坡度因素主效应	$y=-0.047 8 X_2^2+10.742 X_2+44.8$ ($R^2=0.96, p=0.00$)
	植被因素主效应	$y=\exp(7.802\sim 14.67/X_2)$ ($R^2=0.60, p=0.25$)
	植被×坡度交互效应	$y=\exp(7.656\sim 16.281/X_2)$ ($R^2=0.76, p=0.05$)

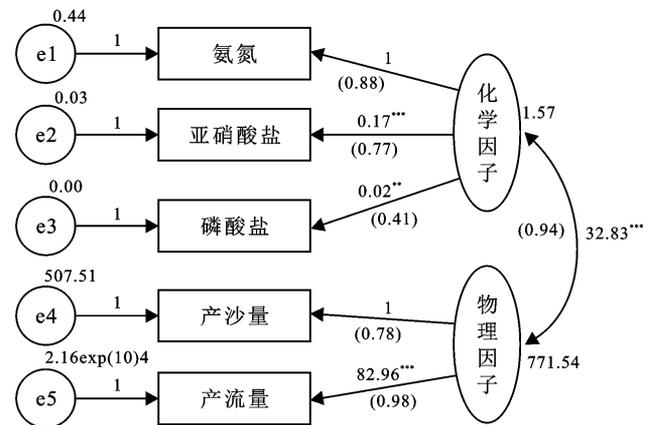
注:回归方程中, X_1 为降雨量; X_2 为降雨侵蚀力; X_3 为平均雨强; X_4 为降雨历时。

2.4 基于结构方程模型(SEM)的坡改梯工程水土保持效应机理分析

基于预设的结构方程模型,代入数据运行,得结果见图 2。该模型的 p 值为 0.154(>0.05, 0.1), 表明了模型的有效性。此外, 3 个拟合度指标均大于或接近 0.9, 表明预设模型很好地拟合了试验数据。其中, 化学因子对亚硝酸盐和磷酸盐的载荷分别为 0.17, 0.12, 而物理因子对产流量的载荷为 82.96, 且均具有统计学意义。因此, 产流量和产沙量各包含有一个共同的物理因子, 即该物理因子可以作为上述两指标水保效应的本质反映。同样地, 化学因子亦可作相同理解。其中, 化学因子对氨氮、亚硝酸盐及磷酸盐的标准化载荷分别 0.88, 0.77, 0.41, 前两者远大于后者, 表明氮素流失是该区土壤养分流失的主要形式。此外, 物理因子同化学因子间的相关系数为 0.94, 也具有统计学意义, 表明二者存在显著的线性相关性。总体上, 研究结果较好地揭示了 5 个水保效应指标间的内在联系。

为深入揭示坡改梯工程的水土保持效应机理, 本研究同时拟合了坡度 0°和坡度 25°两种条件下的预设模型, 结果见图 3。由于两个模型是同时拟合的, 这本该需要有更大的样本量, 但本研究总样本量有限, 待平均分配至每个模型时, 样本量即已严重不足, 这可能是造成总体模型 p 值显著的根本原因。但除 AGFI 外, 另外两个拟合度指标仍接近于 0.9, 因此该模型较好地配适了试验数据, 而试验数据则涵盖了研究区一

年中雨季的主要降雨事件, 所以对于水土保持效应研究而言, 该模型结论仍然具备一定的参考价值。



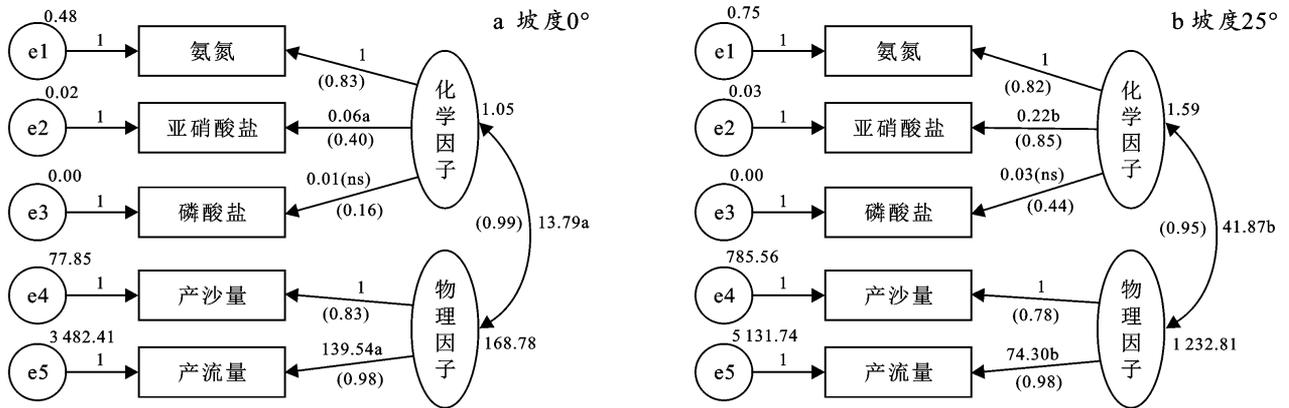
注: $C_{min}/DF=1.67, p=0.15, GFI=0.96, AGFI=0.86, CFI=0.99$; 线上为非标准化载荷, 线下括号中为标准化载荷; ** 表示 $p<0.01$; *** 表示 $p<0.001$ 。

图 2 坡改梯工程水土保持效应机理的 SEM 分析
Fig.2 SEM analysis of soil and water conservation effect mechanism in slope-to-terrace engineering

图 3 表明, 化学因子对亚硝酸盐的载荷、物理因子对产流量的载荷在坡度 0°和坡度 25°两种条件下存在显著差异。这一事实说明尽管在两种坡度条件下, 产流量和产沙量包含有一个共同的物理因子, 氨氮、亚硝酸盐及磷酸盐流失量包含有一个共同的化学因子, 但在坡度 0°和坡度 25°两种条件下, 此二者存在显著的差异。换言之, 本研究所涉及的 5 个水保效应指

标,即使进一步从本质上分为两大类潜在因子,在不同坡度条件下它们发挥的水保效应亦是不同的。其中,坡度由 0°上升为 25°时,化学因子对亚硝酸盐和磷酸盐的标准化载荷分别由 0.40,0.16 上升为 0.85,0.44,表明随着坡度的增加,该区土壤养分流失中亚硝酸盐和磷酸盐的比重呈上升趋势。此外,物理因子同化学因子间的相关系数在不同坡度条件下也存在显著差异,表明坡度对于此二潜在因子的相关性具有

显著影响。具体而言,在坡度 0°条件下,物理因子同化学因子间的相关系数为 0.99,随着产流量与产沙量的增加,土壤养分流失如氨氮、亚硝酸盐及磷酸盐等指标几乎严格按照固定比例增加,反之亦然。而随着坡度的增加,二者相关系数降为 0.95,尽管仍然属于高度线性相关范畴,但物理因子的残差则由 168.78 上升为 1 232.81,即此时物理因子同化学因子的流失程度已出现明显的不同步现象。



注: $C_{min}/DF=3.57, p=0.00, GFI=0.86, AGFI=0.62, CFI=0.86$;线上数据为非标准化载荷,线下括号中数据为标准化载荷;ns 表示该非标准化载荷无统计学意义($p>0.05$);分图 a, b 中对应的非标准化载荷,或相关系数,后接小写英文字母相同表示其在两种坡度处理间不存在显著差异($p>0.05$)。

图 3 坡改梯工程水土保持效应机理 SEM 分析中的坡度群组比较

Fig.3 Comparison of slope groups in SEM analysis of soil and water conservation effect mechanism in slope-to-terrace engineering

2.5 基于综合因子的坡改梯工程水土保持效应差异性比较

以上述 5 个水保效应指标为基本因子,进行 PCA 分析,结果表明,第一、第二主成分的特征值分别为 3.28,0.76,二者可以解释总方差变异的 80.8%。以此二主成分因子得分为基础,并以其相应的总方差解释率为权重,构建了综合评价指标,其表达式为:第一主成分因子得分 $\times 65.62\%$ +第二主成分因子得分 $\times 15.17\%$ 。这样所构建的综合评价指标已经包含了 5 个原始变量 80.8%的信息,但此时的水保效应指标已经是一个一维变量了,为从总体上评价坡改梯工程的水保效应,而非传统上的单一指标进行多次评价,提供了便利。集合 5 个指标的信息,综合水保效应最佳的为试验处理坡度 0°+草本盖度 80%和坡度 25°+草本盖度 80%,坡度 0°+草本盖度 0%次之,而坡度 25°+草本盖度 0%的水保效应最差(图 4)。

明^[1]。然而,人们对坡改梯水土保持效应机理的理解还很有限,目前仅有的认识也带有显著的“感官直觉”特征^[12],始终缺乏一种深刻的理论认知,终将制约其在水保实践中的进一步应用发展。

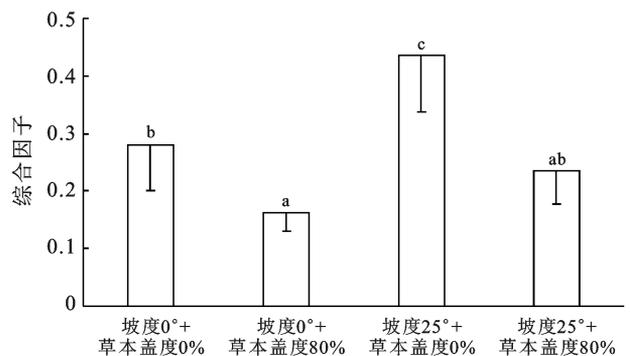


图 4 坡改梯工程综合因子水土保持效应的差异性比较

Fig.4 Comparison of soil and water conservation effects of comprehensive factors in slope-to-terrace engineering

3 讨论

坡耕地是中国水土流失的主要策源地;坡地改梯田则是我国区域内 25°以下坡耕地水土流失治理的主要措施,其水土保持效应已经在实践中得到充分证

明。坡改梯工程的水土保持效应是实现其经济效益和社会效益的基础。当前众多学者通过对比法来实现坡改梯水保效应的定量评价,即坡改梯水保效应同参照水平相比的增量占参照水平水保效应值的百分

比^[18]。在定义多种具实际意义参照水平的基础上,本研究基于 5 个指标分别计算了坡度 25°与 0°条件下植被因素,以及植被盖度 80%与 0%条件下坡度因素的水保效应,从而实现多角度、多层次的水保效应分析。如在本研究中,坡度 0°条件下植被因素水保效应的结论是在排除坡度影响的基础上得出的,其数值不仅真实反映了植被因素的水保效应,而且亦可作为坡改梯工程实施后有无辅以植被措施时产流量、产沙量差异大小的衡量,从而兼具显著的实践应用价值。总体而言,对比法具有原理简单,结果高效的特点,只要设置好合理的参照水平,即可计算出相应特定目标的水保效应,因此具有宽广的应用面。此外,通过深度综合分析,则可得到更多具较大理论与实践价值的结论,如本研究发现坡度 0°条件下的总体水保效应要高于坡度 25°条件下,从而表明坡度因素可以影响植被因素的水保效应,并由此进一步可初步判定二者协同效应的存在。

坡改梯工程水保效应涉及两大核心要素:首先是坡度,其次是植被。已有众多研究表明,坡度、植被盖度同坡面侵蚀强度、产流产沙量间存在显著的相关性^[10-12]。前人倾向于分别独立研究水保治理措施各要素的主效应;当前,同时考察多种因素,并将其复杂的内在交互项考虑在内的水保效应深度机理研究仍较薄弱,但这却是相关理论研究深入发展的内在要求。本研究基于线性模型,通过同一时空条件下水保效应的联合分析,将总水保效应分解为坡度因素主效应、植被因素主效应以及二者间交互效应等三部分,不仅定量评价了各因素的主效应,而且首次精确衡量了因素间的交互效应,进一步在同一模型中实现各组分贡献相对重要性的比较,从而深度揭示其内在规律性。例如,本研究表明对于氮氮流失量、磷酸盐流失量而言,不论处于何种降雨条件下,植被因素的贡献居于优势地位,而坡度及二者交互项的贡献较有限,由此从理论上直接证明了植被因素对于减少农田化学面源污染的重要价值,以及坡改梯工程实施后需尽快辅以植被治理措施的必要性。再如对于产沙量而言,坡度与植被因素交互作用的贡献率在降雨量逐步增加条件下分别为 75.13%, 66.14%, 72.01%, 69.63%, 65.38%, 67.46%, 因此不论降雨特性如何改变,二者交互项才是产沙量最重要的贡献者,其主效应的贡献反而极低。该结论明确指出了实际工作中减少产沙量的一个重要依据——重视坡度与植被因素的协同效应,单凭任何一个因素单独发挥作用是难以取得良好实效的。本研究首先基于线性模型实现模型各组分水保效应的成功分解,进而通过各组分相

对贡献率的精确计算,由此深度剖析与评价坡改梯工程水保效应产生的真实根源,而之前仅仅通过对比法是无法获得这种深刻认知的。所有这些实质性结论表明了模型各组分(坡度、植被、坡度×植被)水土保持效应的普遍意义及其内在规律的复杂性,深化了人们对其具体机理的认识,同时也深刻彰显了线性模型分解方法在水保机理研究中的巨大应用潜力。

降雨是坡地产生水土流失的原动力^[15],因而也是各生态措施发挥水保效应的先决条件和前提。本研究在精确估计坡度、植被因素及二者交互项水保效应的基础上,进一步探究了 5 个效应指标各组分(坡度、植被、坡度×植被)水保效应同降雨量、降雨剪切力等原动力指标的内在联系。随着降雨量的增加,对氮氮流失量和产流量指标而言,坡度因素的贡献率总体上呈现出先增加后降低的趋势,而交互项的贡献率则表现出相反的趋势。而对产沙量而言,交互项的贡献率始终居于优势地位,且此结果在一定范围内不受降雨特性的影响。上述规律在本质上仍属于定性分析的范畴,为上升至理论研究所必需的定量领域,本研究采用多重回归分析技术,建立各水保效应值同降雨特性指标间的数学模型。其中,硝酸盐流失量坡度因素主效应可由降雨特性的 4 个指标同时进行拟合,获得了效果极佳的回归模型: $y = -0.321 - 0.017 X_1 - 0.002 X_2 + 0.054 X_3 + 0.163 X_4$ ($R^2 = 0.99$, $p = 0.04$)。该模型证明了降雨特性是影响硝酸盐流失量坡度因素主效应的唯一重要因素,也阐明了降雨特性 4 个指标的详细作用机理。再如,磷酸盐流失量各组分效应同降雨特性间的 3 个回归模型,表明降雨侵蚀力是影响植被、坡度主效应的最重要因素,而降雨量则是决定坡度×植被水保效应大小的关键因素。这些数学模型从理论层次上精确描述了坡度、植被、坡度×植被水保效应同其影响因素间的非线性数学联系,为刻画二者复杂多变的表象趋势提供了理论工具,同时也深刻揭示了上述线性模型各组分水保效应的作用机理,是其理论研究的进一步拓展。未来研究中,如能进一步拓展降雨特性的跨度,将可能取得更加丰富可靠的结论,由此深化人们对水保效应机理的理解,并可据此构建更高预测精度的数学模型。

SEM 属于第二代统计分析技术,是多元分析的利器^[17]。研究表明,模型主要拟合指数 $GFI = 0.96$, $AGFI = 0.86$, $CFI = 0.99$, 因此预设模型很好地拟合了试验数据,即预设模型可以作为上述水保效应因素间本质关系的直接反映。此时,由于将全部试验因素同时纳入模型,该理论框架不仅获得了具更高精度的研究结论,而且较其他分析方法,可实现更多特定的

研究目标。产流量和产沙量包含有一个共同的物理因子,氨氮、亚硝酸盐及磷酸盐流失量包含有一个共同的化学因子,即从本质上讲,该物理因子和化学因子可以作为上述 5 个指标水保效应的本质反映,而它们间的关系亦可简化为此二理化因子间的联系,而这种结论是在综合全部试验因素分析后得出的,具有全局性意义。

为深入探讨坡改梯工程中坡度因素的水保效应,本研究通过 AMOS 软件的群组分析功能,同时验证了两种坡度条件下的预设模型。研究表明,两种坡度条件下,上述二理化因子内部的各指标载荷以及二者间协方差均存在显著差异。如在坡度 0° 和 25° 条件下,化学因子对亚硝酸盐的载荷分别为 0.06, 0.22, 且二者存在显著差异,因此在坡度 25° 条件下,亚硝酸盐对化学因子的贡献是显著增加的,即不同坡度条件下化学因子的组成是有区别的。而物理因子对产流量的载荷分别为 139.54, 74.30, 且二者存在显著差异,表明在坡度 25° 条件下,产流量对物理因子的贡献是显著降低的,换言之,随着坡度的增加,产沙量对物理因子的贡献呈上升趋势。此外,随着坡度的增加,物理因子同化学因子的相关系数降为 0.95, 尽管仍然属于高度线性相关范畴,但此时二者流失程度已出现显著的不同步现象。在相同降雨条件下,坡度低时雨水径流在坡面停留时间长,土壤浸润与养分析出时间长,化学因子流失具有较高的占比;而坡度增加时雨水径流在坡面停留时间减少,土壤浸润与养分析出时间相应减少,此时化学因子流失占比即呈下降趋势。这即是物理因子同化学因子流失随坡度增加出现上述不同步现象的根本缘由。这些结论充分说明了不同坡度条件下二理化因子的水保效应机理,及其具体差异,在相当程度上丰富了人们对其的理论认知。

合理评价各种水土流失治理措施的水保效应无论在理论探索还是在实践中均具有先决意义。当前,前文述及的对比法被广为应用。尽管该法具有众多诸如形式灵活、应用直观等优点,也具有较深的理论挖掘价值,但其计算特性决定了在单次分析中仅能处理一个指标,难以发挥多元分析的优点。例如,为探讨不辅以植被治理措施时坡改梯工程的水保效应,可以通过对比本研究中坡度 0° +草本盖度 0% 和坡度 25° +草本盖度 0% 两种试验处理效应来得到。鉴于本文共设计 5 个试验指标,因而采用对比法可以计算出 5 个水保效应值,尽管获得多层次的结论,但在同其他治理措施横向对比时就显得极为不便。因此,本研究基于主成分分析原理,构建一个包含全部原始指标核心信息的综合性指标,并据此深入分析了

4 种试验处理的水保效应。此时,所构建的一个综合评价指标已经包含了 5 个原始变量 80.8% 的信息,由此实现水保效应指标由多维向一维的转化,从而为从总体上评价坡改梯工程的水保效应,而非传统上的单一指标进行多次评价,提供了便利。结果表明,坡度 0° +草本盖度 0% 和坡度 25° +草本盖度 80% 试验处理间综合水保效应差异不显著,换言之,坡改梯工程若不及时辅以植被治理措施跟进,那么其总体水保效应同野外撂荒坡地相同。这种结论不是针对具体某一指标而言的,如产流量或磷酸盐流失量,而是集合全部试验指标主体信息得到的综合性结论。相比单一指标分析方法,该综合性指标减少了人为主观干扰,从而提升了结论的客观性。

自然界中,水土流失现象具有显著的尺度效应。就具体坡位而言,它既是其上坡位的水土流失“汇”,又是其下坡位的水土流失“源”;随着坡位的向下延伸,会出现径流侵蚀能量逐级衰减及入渗增加等现象,这种坡位间的相互作用受到坡长、坡面大小的显著影响。本文仅针对基于小区观测的坡改梯工程进行了探究,今后将研究对象扩展至小流域级别,结合流域水文、气候资料,充分考虑上述尺度效应的坡改梯工程水保效应机理研究必然具有重要理论价值。

4 结论

本研究采用对比法、线性模型、结构方程模型以及基于主成分分析原理的综合评价法,从坡改梯工程两大基本要素坡度、植被因素水保效应的精确估计出发,基于二者及其交互项的相对贡献率,探讨其水保效应的真实根源,及其具体影响因素,深度揭示其水保效应机理,构建综合性客观指标,实现水保治理措施效应的整体性综合定量评价,对坡改梯工程水保效应机理进行深度剖析。

(1) 基于对比法从多角度、多层次评价了坡改梯工程的水保效应。对比法具有原理简单,结果高效的特点,只要设置好合理的参照水平,即可计算出相应特定目标的水保效应,且通过深度综合分析,仍可得到具较大理论与实践价值的结论。例如在本研究中,坡度 0° 条件下植被因素水保效应的结论是在排除坡度影响的基础上得出的,其数值不仅真实反映了植被因素的水保效应,而且亦可作为坡改梯工程实施后有无辅以植被措施时产流量、产沙量差异大小的衡量。此外,对比法研究结果亦可初步判定坡度与植被因素间协同效应的存在。

(2) 基于线性模型,通过同一时空条件下水保效应的联合分析,将总水保效应分解为坡度因素主效

应、植被因素主效应以及二者间交互效应等三部分,不仅定量评价了各因素的主效应,而且首次通过数学模型精确衡量了因素间的交互效应,进而通过各组分相对贡献率的精确计算,实现各组分贡献相对重要性的比较,由此深度揭示与评价坡改梯工程水保效应产生的真实根源,而之前仅仅通过对比法是无法获得这种深刻认知的。研究结论清晰地显示了模型各组分水保效应的普遍意义及其内在规律的复杂性,同时也表明了基于线性模型水保效应分解方法的有效性、普遍性和优越性。例如,对于产沙量而言,坡度与植被因素交互作用的贡献率在降雨量逐步增加条件下分别为75.13%,66.14%,72.01%,69.63%,65.38%,67.46%,因此不论降雨特性如何改变,二者交互项才是产沙量最重要的贡献者,其主效应的贡献反而极低。该结论明确指出了实际工作中减少产沙量的一个重要依据——重视坡度与植被因素的协同效应,单凭任何一个因素单独发挥作用是难以取得良好实效的。再如本研究表明对于氮氮流失量、磷酸盐流失量而言,不论处于何种降雨条件下,植被因素的贡献居于优势地位,而坡度及二者交互项的贡献较有限,由此从理论上直接证明了植被因素对于减少农田化学面源污染的绝对价值,以及坡改梯工程实施后需尽快辅以植被治理措施的极端必要性。这些结论刷新了人们的“直觉”认知,真正厘清了水保效应产生的真实根源,也为提升水保实践效率提供了准确的理论依据。

(3) 基于多重回归分析技术,分别建立各指标坡度、植被、坡度×植被等组分水保效应值同降雨特性指标间的最优数学模型,从理论层次上精确刻画二者复杂多变的表象趋势,深刻揭示了上述各组分水保效应的具体影响因素与内在机理,是其理论研究的进一步拓展。比如,硝酸盐流失量坡度因素主效应可由降雨特性的4个指标同时进行拟合,获得了效果极佳的回归模型: $y = -0.321 - 0.017 X_1 - 0.002 X_2 + 0.054 X_3 + 0.163 X_4 (R^2 = 0.99, p = 0.04)$ 。该模型表明,降雨特性是影响硝酸盐流失量坡度因素主效应的唯一重要因素,也阐明了降雨特性4个指标的详细作用机理。再如,磷酸盐流失量各组分效应同降雨特性间的3个回归模型,表明降雨侵蚀力是影响植被、坡度主效应的最重要因素,而降雨量则是决定坡度×植被水保交互效应大小的关键因素。这些数学模型从理论层次上精确描述了坡度、植被、坡度×植被水保交互效应同其影响因素间的非线性数学联系,由此深刻揭示了上述线性模型各组分水保效应的影响因素与作用机制。

(4) 基于结构方程模型(SEM),验证了含物理因子、化学因子两个潜变量在内的具体理论模型作为全文5个指标水保效应本质反映的合理性,模型主要拟合指数 $GFI=0.96, AGFI=0.86, CFI=0.99$ 。由于将全部试验因素同时纳入模型,这种结论便具有全局意义。进一步基于SEM群组分析,同时拟合并验证了两种坡度条件下的预设模型,清晰直观地展示了各因素间的内在联系。这也是SEM在水保效应机理研究中的首次尝试与应用,充分说明多因素路径模型在理论研究中的应用价值。研究表明,在坡度 0° 和 25° 条件下,化学因子对亚硝酸盐的载荷分别为0.06,0.22,而物理因子对产流量的载荷分别为139.54,74.30,且二者存在显著差异,表明同前者相比,在坡度 25° 条件下,亚硝酸盐对化学因子的贡献是显著增加的,而产流量对物理因子的贡献则是显著降低的,即不同坡度条件下,上述二理化因子的内涵组成是存在差异的。而此二者间协方差的显著差异则提示坡度对二者的相关性具有显著影响。此外,随着坡度的增加,物理因子同化学因子的相关系数降为0.95,尽管仍然属于高度线性相关范畴,但此时二者流失程度已出现显著的不同步现象。这些结论充分说明不同坡度条件下上述二理化因子的水保效应机理,及其具体差异,在相当程度上丰富了人们对其的理论认知,显示了多因素联合分析在未来机理研究中的巨大优势和潜力。

(5) 基于主成分分析原理,本研究成功构建了包含多个指标信息的综合性因子。其已包含5个原始变量80.8%的信息,由此将水保效应评价指标由五维转变为一维,克服了传统上单一指标多次评价的不足,同时显著降低了人为主观干扰,从而实现水保治理措施效应的整体性综合定量评价,提升了研究结论的可靠性与客观性。

综上所述,基于高阶数据分析方法,可实现多因素水保效应机理研究结论的深度整合,加深人们对其具体机理的认识,亦可为多指标机理研究提供方法论参考,有助于构建更高预测精度的专业数学模型,提升水土流失治理实践的效率。

[参 考 文 献]

- [1] 李亚龙,张平仓,程冬兵,等.坡改梯对水源区坡面产汇流过程的影响研究综述[J].灌溉排水学报,2012,31(4):111-114.
- [2] Chen Die, Wei Wei, Chen Liding. Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis [J]. Earth-Science Reviews, 2017,173:109-121.
- [3] 李艳梅,王克勤,刘芝芹,等.云南干热河谷不同坡面整地方式对土壤水分环境的影响[J].水土保持学报,2006,20

- (1);15-19.
- [4] Luo Jian, Zheng Zicheng, Li Tingxuan, et al. Spatial heterogeneity of microtopography and its influence on the flow convergence of slopes under different rainfall patterns [J]. *Journal of Hydrology*, 2017,545:88-99.
- [5] Liu Q J, Shi Z H, Yu X X, et al. Influence of microtopography, ridge geometry and rainfall intensity on soil erosion induced by contouring failure [J]. *Soil and Tillage Research*, 2014,136:1-8.
- [6] Arnáez J, Lana-Renault N, Lasanta T, et al. Effects of farming terraces on hydrological and geomorphological processes. A review [J]. *Catena*, 2015,128:122-134.
- [7] Nunes J P, Bernard-Jannin L, Rodríguez Blanco M L, et al. Hydrological and erosion processes in terraced fields: Observations from a humid Mediterranean region in northern Portugal [J]. *Land Degradation & Development*, 2018,29(3):596-606.
- [8] Chen Rongsong, Yang K H. Terraced paddy field rainfall-runoff mechanism and simulation using a revised tank model [J]. *Paddy and Water Environment*, 2011,9(2):237-247.
- [9] Marques M J, Bienes R, Jiménez L, et al. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events. Rainfall simulation over USLE plots [J]. *Science of the Total Environment*, 2007,378(1/2):161-165.
- [10] 徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 等. 植被与水土流失关系研究进展[J]. *生态学报*, 2006,26(9):3137-3143.
- [11] 吴蕾. 黄土高原植被水土保持作用的研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [12] Tarolli P. Agricultural Terraces special issue preface [J]. *Land Degradation & Development*, 2018,29(10):3544-3548.
- [13] Wei Wei, Chen Die, Wang Lixin, et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016,159:388-403.
- [14] Deng Chuxiong, Zhang Guangye, Liu Yaojun, et al. Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021,9(3):344-359.
- [15] Donjatee S, Chinnarasri C. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the application of vetiver grass mulch in soil and water conservation [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2012,27(2):168-177.
- [16] Chen Liding, Huang Zhilin, Gong Jie, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China [J]. *Catena*, 2007,70(2):200-208.
- [17] Liu Jianbo, Gao Guangyao, Wang Shuai, et al. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018,28(1):59-78.
- [18] Han Dandan, Deng Jingcheng, Gu Chaojun, et al. Effect of shrub-grass vegetation coverage and slope gradient on runoff and sediment yield under simulated rainfall [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2021,36(1):29-37.
- [19] Dudewicz E J. Preface-multivariate analysis in the new century [J]. *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, 1998,18(1/2):1-6.
- [20] 周晗. 黄土区土壤侵蚀与养分流失对降雨因子、坡度的响应[D]. 山西 太原: 山西大学, 2019.
- [21] 周晗, 严俊霞, 李洪建, 等. 晋西黄土区坡耕地不同下垫面水土流失对侵蚀性降雨的响应[J]. *水土保持研究*, 2019,26(4):7-12.
- [22] 董晓辉. 娑婆小流域坡耕地氮素流失特征与防治对策研究[D]. 山西 太谷: 山西农业大学, 2016.
- [23] 郭宇, 王树森, 马迎梅, 等. 植被毯对内蒙古清水河县黄土丘陵沟壑区黄土边坡产流产沙量的影响[J]. *水土保持学报*, 2019,33(6):61-71.
- [24] 薛东明, 郭小平, 张晓霞. 干旱矿区排土场不同边坡生态修复模式下减流减沙效益[J]. *水土保持学报*, 2021,35(6):15-21.
- [25] 寇馨月, 黄俊, 姜学兵, 等. 不同下垫面径流小区次降雨对产流产沙的影响[J]. *水土保持通报*, 2017,37(2):27-31.
- [26] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. *地理科学*, 2002,22(6):705-711.
- [27] 殷水清, 王杨, 谢云, 等. 中国降雨过程时程分型特征[J]. *水科学进展*, 2014,25(5):617-624.
- [28] Liu Yifan, Liu Yu, Wu Gaolin, et al. Runoff maintenance and sediment reduction of different grasslands based on simulated rainfall experiments [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,572:329-335.
- [29] Kline R B. Principles and Practice of Structural Equation Modeling, Third Edition [M]. Guilford publications: The Guilford Press, 2010.
- [30] 侯杰泰, 温忠麟. 结构方程模型及其应用[M]. 北京: 教育科学出版社, 2004.
- [31] 张文彤, 董伟. SPSS 统计分析高级教程[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2018.