

基于耦合关联分析的护岸植被恢复土壤抗蚀性综合评价^①

谢贤健, 张 彬

(内江师范学院地理与资源科学学院, 四川内江 641000)

摘要:为综合评估护岸植被对土壤抗蚀性的影响,选取草地、灌木、乔草和乔灌草模式土壤为研究对象,以自然坡面为对照,利用主成分分析法分析不同理化指标对土壤抗蚀性的影响,同时利用灰色关联度分析法分析土壤理化性质指标与土壤抗蚀性指标之间的关联程度,并在此基础上构建土壤理化性质指标与抗蚀性指标的耦合模型,以综合评价不同护岸植被模式土壤的抗蚀性。结果表明:>0.25 mm 水稳性团聚体、容重、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、平均重量直径和水稳性指数是影响研究区土壤抗蚀性的主要因子,其中 >0.25 mm 团聚体对区域土壤抗蚀性的影响程度最大;平均重量直径、水稳性指数与土壤理化性质指标呈中等关联性,其关联性排序为 >0.25 mm 团聚体>有机质>碱解氮>有效磷>速效钾>容重;不同护岸植被模式土壤抗蚀性质与理化性质指标的系统耦合度整体属于弱协调,协调度的大小顺序为乔草>乔灌草>草地>灌木>自然坡面,乔草模式属于中度协调,其他模式均属于弱协调状态,说明乔草模式为护岸植被的最佳组合模式。土壤抗蚀性质与理化性质指标的协调程度可以为科学改善河岸土壤结构、提高土壤抗蚀性及为护岸植被的优选提供参考依据。

关键词:土壤抗蚀性;综合评价;耦合关联;护岸植被

中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A

土壤抵抗外营力对其分散和破坏的能力即土壤的抗蚀性^[1],土壤自身的理化性质如:结构、质地、腐殖质含量、吸收性复合体的组成等决定了土壤抗蚀能力的强弱^[2]。此外^[3],植物利用枯枝落叶的机械保护,以及根系的穿插、盘绕和固结可以有效地减弱降水对土壤的冲刷破坏,显著改善土壤的理化性质,从而增强土壤抗蚀性。因此,土壤抗蚀性是土壤内在理化性质和外环境因素的综合作用结果,土地利用方式、植被覆盖类型的差异同样显著影响土壤抗蚀性。谢贤健等^[4]比较分析了不同巨桉林模式下土壤抗蚀性的差异,结果表明,巨桉纯林地优于耕地优于林粮地优于林果地;白秀梅等^[5]分析了关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性,结果表明,撂荒地的土壤抗蚀性明显好于其他植被恢复类型;王佩将等^[6]发现,退化喀斯特植被恢复过程中以灌草搭配的植被恢复模式抗蚀性最优。总体来看,不同植被覆盖模式对土壤抗蚀性的影响较为显著^[7-8]。

沱江是长江上游的一级支流,在人类活动不断的影响下出现了一些较突出的生态环境问题。如:余树全等^[9]从土壤抗蚀性和渗透性等方面研究了沱江上

游不同深丘地区立地的情况,发现沱江上游地区人为破坏比较严重,总体上土壤砂性比较重,土壤的结构不稳定,不利于水土保持;孟兆鑫等^[10]通过研究发现,沱江下游生态安全尤其令人担忧,同时指出作为生态预警之一的水土流失因子对流域生态安全建设的重要性,除此之外,还存在流域内土壤承载力下降、植被覆盖率低等生态安全问题。河岸带作为人们进行生产和生活的重要场所,对于人类生存意义重大^[11]。目前对于河岸的研究主要集中于河岸结构、功能、影响因素^[12-14]及其保护和退化生态恢复等^[15-17]。河岸植被带是河岸带的重要组成部分,维护着河流生态系统稳定,在区域生态环境改善中发挥着重要屏障作用^[18-19]。同时,河岸植被区处于陆地生态系统和河流生态系统的交错地带,属于生态敏感、脆弱区域,该区域受到人类的干扰性强,其植被恢复过程异于普通坡面植被,其研究对河流两岸水土保持具有重要意义^[20]。而河岸带的植被恢复研究则主要侧重于植被的构建及其多样性的分析,然而关于不同护岸植被模式下土壤的抗蚀性分析未见报道,尤其是不同恢复植被的抗蚀性指标和理化性质指标之间相互作用程度、

基金项目:长江科学院开放研究基金项目(CKWV2017523/KY)和四川省教育厅重点项目(16ZA0312)资助。

作者简介:谢贤健(1978—),男,四川广汉人,博士,教授,主要研究方向为水土保持理论及技术研究。E-mail: xxj007-14@tom.com

不同理化性质对抗蚀性的影响并未被学者研究,因此难以综合理解不同护岸植被的土壤抗蚀性优劣。耦合关联分析为深入研究各因子之间关系及过程,揭示生态系统的协同、约束关系提供了良好的方法^[21]。本研究以沱江中下游内江河段为例,选择草地、灌木、乔草、乔灌草 4 种护岸植被类型为研究对象,以自然坡面作为对照,采用主成分分析、灰色关联度分析等方法,分析不同护岸植被模式下土壤的抗蚀性特征,构建抗蚀性指数与土壤理化性质指标的耦合模型,对不同护岸植被模式的抗蚀性进行综合判定,以为河岸的治理及不同护岸植被的选择提供理论指导。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省内江市境内沱江两岸,地理位置 104°15′~105°26′ E、29°11′~30°2′ N,为四川盆地中南部丘陵区。该区属亚热带季风性湿润气候,气候比较温和,雨量较为充沛;年均温 15~28℃,月均温 1 月 6~8℃,7 月 26~28℃;年均降雨量约为

1 000 mm,多集中在夏季,约占全年 55%,雨热同期,春季约占 17%,冬季仅占 5%,春夏季干旱频率较高,年日照时数 1 100~1 300 h,无霜期约为 330 d。土壤类型为紫色土。护岸植物主要有香樟(*Cinnamomum camphora* (L.) Presl)、垂柳(*Salix babylonica*)、红叶石楠(*Photinia × fraseri* Dress)、肾蕨(*Nephrolepis auriculata* (L.) Trimen)、山杜英(*Elaeocarpus sylvestris* (Lour.) Poir.)、小叶女贞(*Ligustrum quihoui* Carr.)和红花檵木(*Loropetalum chinense* var. *rubrum*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择和样品采集 于 2016 年 7 月进行野外采样,选择沱江护岸植被包括草地、乔灌草、灌木以及乔草(4 种植被模式于 2014 年 7 月栽培)为研究对象,以自然坡面为对照。每种植被模式选择 3 个样地,在每个样地内沿对角线均匀设 3 个样点,进行混合取样,取土约 3 kg,取样深度 0~20 cm,共采集 15 个样品。在采样和搬运过程中,为保护土壤团聚体不被破坏,应减少对样品土壤的扰动。土样于室内自然风干,而后沿着土壤自然结构剖面掰成小土块,清除残渣和石块。样地的基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic situation of studied plots

样地	坡度(°)	坡向	植被覆盖率(%)	主要植物种类
草地	14	东南	90	白三叶、肾蕨
乔草	13	东南	95	山杜英、紫叶李、肾蕨、美人蕉
乔灌草	11	西南	95	香樟、天竺桂、通花根、金边冬青卫矛、肾蕨
灌木	15	西南	95	红花檵木、红叶石楠、梔子
自然坡面	9	东北	85	-

1.2.2 土壤理化指标测定 土壤团聚体测定:采用湿筛法。取土样 200 g 放置在团粒分析仪上,团粒分析仪套筛孔径分别为 5、2、1、0.5 和 0.25 mm。调整团粒分析仪桶内水面的高度,使筛子移动到最高位置时最上一层筛子中的团聚体刚好淹没在水面以下。待团聚体在水面下浸泡 10 min 时开动仪器,以每分钟 30 次的速度筛分 5 min。湿筛后,将每一层筛上的团聚体分别洗入铝盒,烘干称量,计算各级团聚体在土样中的质量分数。

土壤抗蚀性测定:采用静水崩解法^[4]。选取直径 >5 mm 的土壤团粒体 150 粒,进行水浸试验,每次 30 粒,重复 5 次,取平均值。每隔 1 min 记录崩塌的土粒数,连续记录 10 min,用于计算水稳性指数。

土壤有机质采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定,容重采用环刀法测定,土壤碱解氮采用碱解扩散法测定,土壤有效磷采用钼锑抗比色法测定,土壤速

效钾采用火焰发射光谱法测定。

1.2.3 数据分析 1)团聚体稳定性分析。团聚体稳定性一般采用平均重量直径(MWD)表示^[4]:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (1)$$

式中: r_i 是第 i 个筛子孔径(mm), $r_0=r_1$, $r_n=r_{n+1}$; m_i 为第 i 个筛子的破碎团聚体质量分数。

2)团聚体水稳性分析。水稳性指数采用如下公式计算^[4]:

$$K = \frac{\sum P_i K_i + P_j}{A} \quad (2)$$

式中: $i=1, 2, 3 \dots 10$; P_i 为第 i min 分散的土粒数量; P_j 为 10 min 内未分散的土粒数; K_i 为第 i min 校正系数; A 为供试土粒总数。

3)土壤抗蚀性评价指标的主成分分析。本研究选取 >0.25 mm 大团聚体含量(x_1)、容重(x_2)、有机质含

量(x_3)、碱解氮含量(x_4)、有效磷含量(x_5)、速效钾含量(x_6)作为土壤理化性质指标,平均重量直径(x_7)和水稳性指数(x_8)作为评价土壤抗蚀性指数指标,采用主成分分析法比较获得影响土壤抗蚀性的主要因子。

$$\xi_i(j)(k) = \frac{\min_i \min_j |Z_i^L(k) - Z_j^L(k)| + \rho \max_i \max_j |Z_i^L(k) - Z_j^L(k)|}{|Z_i^L(k) - Z_j^L(k)| + \rho \max_i \max_j |Z_i^L(k) - Z_j^L(k)|} \quad (3)$$

式中： $\xi_i(j)(k)$ 为不同护岸植被模式的第 k 个样本点的土壤理化性质 i 和土壤抗蚀性指数指标 j 的关联系数； $Z_i^L(k)$ 和 $Z_j^L(k)$ 分别为土壤理化性质 i 和土壤抗蚀性指数指标 j 的标准化值； ρ 为分辨系数，一般取值 0.5。

将不同护岸植被模式样本的土壤理化性质 i 和土壤抗蚀性指数指标 j 的关联系数求平均值，得到 $m \times n$ 的关联度矩阵 γ ，它能够从整体上反映土壤理化性质单个指标和土壤抗蚀性指数指标之间的关联程度。其中， m 代表土壤理化性质指标数， n 代表土壤抗蚀性指数指标数，当 $0 < \gamma_{ij} \leq 1$ 时，说明存在关联性， γ_{ij} 值越接近 1，表明两者的关联度越大，耦合作用越强^[15]。当 $0 < \gamma_{ij} \leq 0.35$ 时，关联度为弱；当 $0.35 < \gamma_{ij} \leq 0.65$ 时，关联度为中；当 $0.65 < \gamma_{ij} \leq 0.85$ 时，关联度为较强；当 $0.85 < \gamma_{ij} \leq 1.0$ 时，关联度为极强^[20]。在关联度矩阵 γ 基础上，依据公式(3)按行或列求均值，可以识别出主要影响因素和反馈情况。

$$d_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

$$d_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \gamma_{ij} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

式中： d_i 表示土壤理化性质(L)第 i 个指标对土壤抗蚀性指数指标(I)的影响关联度； d_j 表示土壤抗蚀性指数指标(I)第 j 个指数指标对土壤理化性质(L)的影响关联度。

为定量比较不同护岸植被模式土壤抗蚀性强弱与土壤理化性质的耦合协调发展程度，进一步构建抗蚀性指数-土壤理化性质指标的耦合模型，耦合度(C)的计算公式为：

$$C = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \xi_i(j)(k) \quad (6)$$

根据世界经济合作与发展组织对系统耦合度的定义(2003年)，当 $0 \leq C < 0.4$ 时，系统严重不协调；当 $0.4 \leq C < 0.5$ 时，系统中度不协调；当 $0.5 \leq C < 0.6$ 时，系统轻度不协调；当 $0.6 \leq C < 0.7$ 时，系统弱协调；当 $0.7 \leq C < 0.8$ 时，系统中度协调；当

4)耦合分析。土壤抗蚀性不能够直接测定，需要选取指标进行综合评定。利用灰色关联度模型^[17]计算关联系数，揭示土壤抗蚀性特征与土壤理化性质的耦合关系和协调程度。关联系数计算如公式(3)：

$0.8 \leq C < 0.9$ 时，系统良好协调；当 $0.9 \leq C < 1.0$ 时，系统优质协调。

5)数据统计分析。所有测定结果用 Excel 进行整理和初步分析；用 SPSS 软件进行主成分及方差分析，多重比较采用 Duncan 法检验，显著水平为 $P < 0.05$ ；用 DPS 软件计算灰色关联度。

2 结果与讨论

2.1 土壤理化指标的差异性分析

不同粒径团聚体对土壤理化性质的影响具有差异性，从而对土壤结构及其抗蚀性形成一定影响^[4]，而土壤粒径的形成过程受到土壤表层植被覆盖的影响。因此，沱江两岸土壤粒径的发育及形成受护岸植被模式的影响。利用 SPSS 软件对研究区土壤水稳性团聚体做方差分析， $F_{0.05}=5.373$ ， $F_{临界}=2.53$ ， $sig.=0.001$ ，结果表明不同植被护岸模式对沱江两岸土壤粒径形成具有显著影响。由表 2 可知，不同护岸植被模式下土壤水稳性团聚体质量分数的总体特征表现为：随着土壤粒径的增大，水稳性团聚体质量分数呈现增加-减小-增加的趋势；同时，除了自然坡面，其他 4 种植被模式均以粒径 2~5 mm 土壤水稳性团聚体质量分数最高，其中，在灌木护岸模式下粒径 2~5 mm 团聚体质量分数达 42.24%，表明在不同护岸植被模式下，不同粒径水稳性团聚体含量的差异性显著。

微粒团聚体通过有机质的胶结形成大团聚体，土壤大团聚体中的有机质含量高，是量度土壤肥力高低的重要指标之一^[22]。从表 2 可知，不同护岸植被模式下， >0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量的排序为草地>灌木>乔草>乔灌草>自然坡面，4 类护岸植被模式的团聚体含量均大于自然坡面，表明护岸植被有利于大团聚体的形成及稳定。采用 Duncan 分析法，对不同护岸植被模式下 >0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量的差异性做进一步的比较分析，可知，草地、灌木、乔草与乔灌草、自然坡面之间具有显著的差异性，而乔灌草与自然坡面之间的差异性不显著，表明草地、灌木、乔草 3 种护岸模式有利于大团聚的形成，这与覆盖植被的养分吸收与释放特点有关。护岸植

被提高土壤的养分含量,使土壤发育与结构形成处于良好状态。

表 2 土壤理化指标
Table 2 Soil physicochemical indexes

护岸植被 模式	水稳性团聚体质量分数(%)						容重 (g/cm ³)	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	MWD	K	
	>5mm	2~5mm	1~2mm	0.5~1mm	0.25~0.5mm	<0.25mm								
草地	20.28	36.41	14.80	9.73	8.21	10.57	89.43 a	1.45c	7.89 b	16.22 d	45.62 c	123.96 a	3.15 a	0.12 c
乔灌草	9.43	28.92	13.69	13.22	12.44	22.30	77.70 b	1.50bc	6.91 c	27.21 b	71.55 b	79.92 c	2.13 b	0.09 cd
灌木	17.92	42.24	12.83	9.50	5.63	11.88	88.12 a	1.57b	7.45 b	22.45 c	45.47 c	119.73 a	3.17 a	0.20 b
乔草	20.28	38.50	15.48	8.95	4.77	12.02	87.98 a	1.42c	12.15 a	30.76 a	85.80 a	106.63 b	3.21 a	0.35 a
自然坡面	5.46	22.29	13.44	17.30	16.81	24.70	75.30 b	1.73a	6.27 d	13.66 e	30.41 d	110.34 b	1.65 c	0.06 d

注:表中同列不同小写字母表示不同护岸植被模式下土壤性质差异在 $P<0.05$ 水平显著;MWD 为团聚体平均重量直径, K 为水稳性指数。

随着土壤的体积质量(容重)增加,会恶化土壤稳定性及减弱土壤的抗蚀性能力^[5]。从表 2 可知,不同护岸植被模式研究区土壤容重大小不一致,其从小到大分别为乔草、草地、乔灌草、灌木和自然坡面,4 类植被覆盖区域的土壤容重均小于自然坡面,表明植被覆盖区域土壤土质疏松,空隙较多,结构性良好。其中乔草和草地之间差异不显著,而其他 3 类植被模式之间具有显著性差异,护岸植被采用乔草和草地模式能有效减小土壤容重,从而使江边两岸形成良好的土壤结构,增加土壤的抗蚀性和稳定性。

土壤有机质含量影响水稳性团聚体的形成及稳定性,与土壤抗蚀性呈正相关关系,在一定程度上作为土壤稳定性的衡量指标^[23]。从表 2 可知,不同护岸植被模式下研究区土壤有机质含量的高低顺序为乔草>草地>灌木>乔灌草>自然坡面,其中最高的为乔草植被,其土壤有机质平均含量为 12.15 g/kg。除了草地和灌木,其他 3 类植被模式之间差异性显著,研究表明前 4 类护岸植被模式有机质含量均大于自然坡面,护岸植被有利于土壤有机质的形成与积累,尤其乔草和草地 2 种护岸植被模式。

土壤中碱解氮、有效磷、速效钾的含量影响区域土壤的结构性,因其对水稳性团聚体的保持、供应和转化能力具有重要作用,并且每类养分对其功效不一致^[24]。研究区不同护岸植被模式下碱解氮含量大小顺序为乔草>乔灌草>灌木>草地>自然坡面,并且 5 类护岸植被模式之间的差异性显著;有效磷含量之间的排序为乔草>乔灌草>草地>灌木>自然坡面,草地和灌木植被之间的差异性不显著,乔草、乔灌草植被和自然坡面之间的差异性显著;速效钾含量从高到低依次为草地、灌木、自然坡面、乔草、乔灌草,草地和灌木植被之间的差异性不显著,乔草植被和自然坡面之间的差异性不显著。不同植被覆盖下,土壤碱解氮、有

效磷和速效钾含量不一致,这可能与不同植被覆盖模式对土壤氮磷钾含量的吸收与释放规律不同有关。

平均重量直径(MWD)能表示土壤团聚体的团聚度,数值越大,表明团聚度越高,代表土壤结构更加稳定,抗蚀性能力更强^[25]。从表 2 可知,研究区不同护岸植被模式下土壤平均重量直径从高到低排序为乔草>灌木>草地>乔灌草>自然坡面,草地、灌木和乔草植被之间的差异性不显著,前 3 种模式与乔灌草植被、自然坡面之间差异性显著,乔灌草植被与自然坡面之间差异性显著。4 类护岸植被模式均好于自然坡面,植被覆盖利于土壤团聚度的提高,更易于形成大团聚体,提高土壤的抗蚀性。

水稳性指数可以衡量土壤团聚体在静水中分散的程度,其值越大,表明土壤的团聚体稳定性越强,土壤的抗侵蚀能力就越强,是衡量土壤抗蚀性重要指标之一^[26]。不同护岸植被模式下土壤的水稳性指数从大到小的排序为乔草>灌木>草地>乔灌草>自然坡面,不同护岸植被模式之间的差异性显著,4 类模式的水稳性指数均大于自然坡面,表明护岸植被有利于土壤结构的优化,可以增强土壤的抗蚀性能力。

2.2 土壤抗蚀性评价指标的主成分分析

区域土壤抗蚀性是土壤各类型理化性质综合作用的结果,其大小受多种土壤理化指标因素的影响,并且因素之间相互作用,使其在综合评价过程中存在重叠效应^[25]。为了保证综合评价抗蚀性的客观性和精度,本研究运用主成分分析对 8 个抗蚀性指标进行分析,定量刻画研究区每项土壤抗蚀性指标之间的差异性及其对土壤整体抗蚀性的贡献率(表 3)。利用 SPSS 软件提取研究区 8 项指标的主成分,前 3 个主成分的特征根值均大于 1,并且其累计贡献率达到 94.915%,表明前 3 个主成分基本包括本次评价指标的全部信息。在第一主成分中,>0.25 mm 团聚体、

容重、平均重量直径和速效钾的主成分载荷大；在第二主成分中，碱解氮、有效磷和速效钾的主成分载荷大，其中， >0.25 mm 团聚体、容重、速效钾的主成分载荷为负值；在第三主成分中，有机质和水稳性指数的主成分载荷值大。总的来说， >0.25 mm 团聚体

的主成分载荷值最高，表明大团聚体对土壤抗蚀性的贡献大，这与白秀梅等^[5]的研究结果具有一致性，同时，土壤容重在前 3 个主成分的主成分载荷均为负值，表明土壤容重越大，土壤结构越不稳定，抗蚀能力越弱。

表 3 土壤抗蚀性指标的主成分分析
Table 3 Principal component analysis indexes of soil anti-erodibility

主成分	主成分载荷								特征根	贡献率(%)	累计贡献率(%)
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8			
1	0.944	-0.649	0.332	0.191	0.149	0.539	0.938	0.452	2.855	35.681	35.681
2	-0.101	-0.502	0.236	0.852	0.800	-0.828	0.042	0.243	2.429	30.364	66.045
3	0.303	-0.262	0.882	0.484	0.522	0.131	0.341	0.854	2.310	28.869	94.915

注：表中 x_1 为 >0.25 mm 团聚体含量， x_2 为容重， x_3 为有机质含量， x_4 为碱解氮含量， x_5 为有效磷含量， x_6 为速效钾含量， x_7 为平均重量直径， x_8 为水稳性指数。

2.3 土壤抗蚀性指标和理化性质指标的关联度分析

基于灰色关联度公式，计算研究区土壤抗蚀性指标与理化性质指标之间的关联程度，其关联矩阵见表 4。从表 4 可知，抗蚀性指标与理化性质指标之间关联值的最大值为 0.841，最小值为 0.575，平均值为 0.714，表明不同护岸模式两类型指标之间呈较强关联性，所选指标之间的耦合性较强。根据公式(4)和(5)计算，分别获得理化性质指标对土壤抗蚀性指标影响的关联度平均值和土壤抗蚀性指标对土壤理化性质指标影响的关联度平均值，可定量分析研究区土壤理化性质指标对区域土壤抗蚀性指标的影响度，也可分析土壤抗蚀性指标对土壤理化性质指标的反馈作用，及其二者之间的耦合关系与相互作用。

从表 4 分析可知，研究区平均重量直径(x_7)和水稳性指数(x_8)对 6 类土壤理化性质指标关联系数值为 0.700 和 0.729，属于中等关联度，表明抗蚀性指标对理化性质指标的反馈作用较强，同时水稳性指数与土壤理化性质指标之间的关联度要略强于平均重量直径。平均重量直径与 >0.25 mm 团聚体之间的关联系数最大，其值为 0.841，这与在主成分分析中主成分载荷值大的研究结果具有一致性，土壤水稳性指数与 >0.25 mm 团聚体、有机质的关联系数较大，其值分别为 0.815 和 0.829，这与有机质对水稳性团聚体形

成有重要作用有关。总的来说，大粒径团聚体对土壤抗蚀性有较强影响。6 类土壤理化性质指标对土壤抗蚀性指标的平均关联系数大小顺序为 >0.25 mm 团聚体(0.828) $>$ 有机质(0.765) $>$ 碱解氮(0.732) $>$ 有效磷(0.712) $>$ 速效钾(0.652) $>$ 容重(0.579)，均呈现中等和较强关联性。研究区的土壤类型为石灰性紫色土，有机质含量低，且研究区位于沱江两岸，土壤中有有机质主要来源于护岸植被落叶的腐殖质化，而人工有机肥很少，其含量高低不仅直接影响土壤水稳性团聚体的形成，且影响土壤中氮、磷元素的释放，从而影响土壤结构稳定性和土壤抗蚀性。有机质与土壤抗蚀性指标具有较强的关联性，应该通过特定植物的栽种与培育，提高沿岸地区土壤有机质含量。紫色土中氮、磷含量匮乏，同时研究区降水丰富，土壤中的氮磷元素容易随降水流失，土壤中碱解氮、有效磷的缺失，影响土壤结构，进而影响土壤抗蚀性，即与土壤抗蚀性指标也表现出较强的关联性。

2.4 土壤抗蚀性指标和理化性质指标的耦合度分析

前人研究结果表明，一些土壤理化性质指标与抗蚀性综合指标(如 MWD、K)存在正负相关关系^[23,27]。前人研究主要通过单一或者多个抗蚀性指标评价不同植被覆盖下土壤的抗蚀性，以及基于土壤理化性质指标与土壤抗蚀性指数建立评价模型，综合评价不同

表 4 综合指标和理化指标的耦合矩阵
Table 4 Coupling matrix of comprehensive index and physiochemical indexes

关联度	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	平均值
x_7	0.841	0.585	0.700	0.680	0.661	0.729	0.700
x_8	0.815	0.609	0.829	0.784	0.763	0.575	0.729
平均值	0.828	0.597	0.765	0.732	0.712	0.652	0.714

植被覆盖下区域土壤的抗蚀性水平。这些评价方法在一定程度上综合评价了土壤抗蚀性水平,但未考虑土壤抗蚀性指标与理化性质指标之间的耦合作用,从而不能全面评价其抗蚀能力和理解两种指标类型之间相互作用的机制,因此本研究采用耦合度模型,定量分析不同护岸植被模式土壤抗蚀性综合指标与理化性质指标之间的耦合协调度,其结果见表 5。从表 5 可知,研究区不同植被模式下综合指标和理化性指标之间的耦合度值介于 0.650 ~ 0.700,平均耦合度为 0.536,表示系统整体处于弱协调状态,土壤理化性质与抗蚀性的协调性没有达到最佳状态。这与两岸土壤土质和植被组合模式有关,也与研究区植被恢复与整治的时间有关。短时间内植被与土壤理化指标、抗蚀性指标之间还处于弱协调状态。从护岸植被模式角度,二者的耦合度从大到小为乔草>乔灌草>草地>灌木>自然坡面,乔草植被模式协调度最高,属于系统中度协调,这与上文分析结果具有一致性。乔草模式下 >0.25 mm 团聚体质量分数、有机质及氮磷含量、MWD 和 K 值均高于其他模式,而容重低于其他模式,从而使土壤形成良好的结构,提高其抗蚀性。乔草模式耦合度高于其他植被覆盖模式,这与植物生理与土壤的协调性有关。其中,乔草模式高于乔灌草模式,这与二者的乔木类型不一致有关。乔草模式的乔木主要为山杜英、紫叶李,属于小乔木,在生长过程中对土壤养分吸收较少,养分归还速率快,地力消耗较小,从而使得土壤理化性质与抗蚀性之间处于较好的协调状态;而乔灌草模式的乔木主要为香樟、天竺桂,分别为大、中型乔木,生长周期长,养分吸收多,地力消耗大,使得其土壤理化性质与抗蚀性处于系统弱协调状态。由以上分析可知,在短时间尺度内进行护岸植被土壤恢复,研究区宜选择小乔木+草本模式更有利于土壤结构的改善,其土壤抗蚀性能提升更快;而高大乔木组合模式可能由于恢复时间及树种配置等原因,恢复效益还未显现,需进一步研究。

表 5 不同护岸植被模式土壤抗蚀性指标和理化性质指标系统耦合协调度

Table 5 System coupling degrees between soil anti-erodibility indexes and physiochemical indexes under different revetment vegetation patterns

植被覆盖模式	耦合度	协调类型
草地	0.668	系统弱协调
乔灌草	0.678	系统弱协调
灌木	0.653	系统弱协调
乔草	0.700	系统中度协调
自然坡面	0.650	系统弱协调

通过对不同护岸植被的土壤抗蚀性综合评价,本研究认为沱江两岸土壤抗蚀性有待进一步提高,目前土壤性质与抗蚀性尚未处于协调状态。因此,应增加河流两岸植被覆盖率,优化护岸植被的覆盖模式,特别加大对乔灌草模式中大型乔木的栽培,通过科学栽种与培育护岸植被,提高土壤有机质及氮磷钾的含量,改善土壤结构,增强土壤抗蚀性。虽然本研究的护岸植被生长周期较短,但在采取土样时研究区护岸植被基本已经成型,可以用于不同植被恢复的土壤抗蚀性研究,该研究结果可为当地政府的水土保持工作提供科学依据。然而,在指标选取和评价方法上仍存在可以改进的地方,同时,由于护岸植被对土壤生态的影响会随着时间变化,因此在未来研究中,对研究区较长植被恢复时间下土壤抗蚀性能的变化特征有必要进行进一步分析。

3 结论

1)护岸植被抗蚀性受多种土壤理化性质的影响,不同植被覆盖对抗蚀性影响程度存在显著差异性。主成分分析和关联度分析表明,研究区影响土壤抗蚀性的因子主要包括>0.25 mm 水稳性团聚体、容重、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、平均重量直径和水稳性指数,其中>0.25 mm 团聚体对土壤抗蚀性影响最大。

2)平均重量直径、水稳性指数与土壤理化性质指标均存在中等关联性,土壤理化性质指标对土壤抗蚀性的影响大小顺序为>0.25mm 团聚体>有机质>碱解氮>有效磷>速效钾>容重。

3)不同护岸植被模式土壤抗蚀性与理化性指标的系统耦合度总体属于弱协调,二者并未达到最佳状态,这与植被恢复的时间和模式相关;不同植被模式协调度的大小顺序为乔草>乔灌草>草地>灌木>自然坡面,乔草模式为中度协调,其他模式均属于弱协调;乔木和草地的植被组合覆盖模式有利于土壤大团聚体的形成,及有机质、氮磷钾等土壤养分的生产与吸收,从而形成良好的土壤结构,提高土壤抗蚀性;同时其他 3 类人工植被覆盖土壤抗蚀性均优于自然坡面,因此在保护植被模式不受破坏的情况下,应优化沱江两岸的植被覆盖类型,以提高土壤的抗蚀性。

参考文献:

- [1] 吴丽丽,张仁陟,康立军.紫色丘陵区坡耕地生物梗的土壤抗蚀性综合评价[J].中国生态农业学报,2014,22(11):1310-1317

- [2] 余晓章, 魏鹏, 范川. 两种巨桉人工林地土壤抗蚀性的比较研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 58-63
- [3] 王俭成, 杨建英, 史常青, 等. 北川地区典型林分土壤抗蚀性分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 71-75
- [4] 谢贤健, 李永飞. 不同巨桉林下紫色土壤抗蚀性与土壤因子的耦合关系分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 97-102
- [5] 白秀梅, 韩有志, 郭汉清. 关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 79-84
- [6] 王佩将, 戴全厚, 丁贵杰, 等. 退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 806-815
- [7] 何淑勤, 宫渊波, 郑子成, 等. 不同植被类型条件下土壤抗蚀性变化特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 17-22
- [8] 郑子成, 杨玉梅, 李廷轩. 不同退耕模式下土壤抗蚀性差异及其评价模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 199-205
- [9] 余树全, 苏增建. 沱江上游深丘地区不同立地土壤抗蚀性、渗透性及其影响因素[J]. 科技, 2003(1): 1-4
- [10] 孟兆鑫, 李春艳, 邓玉林. 沱江流域生态安全预警及其生态调控对策[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(2): 1-8
- [11] 岳隽, 王仰麟. 国内外河岸带研究的进展与展望[J]. 地理科学进展, 2006, 37(5): 14-17
- [12] 王村, 赵振兴. 河岸植被对水流影响的研究现状[J]. 水资源保护, 2003, 19(6): 50-53
- [13] 陈吉泉. 河岸植被特征及其在生态系统和景观中的作用[J]. 应用生态学报, 1996, 7(4): 439-448
- [14] Zube E H, Simcox D, Friedman S. Desert riparian landscapes: Values and change, 1981-96[J]. Landscape and Urban Planning, 1998(42): 81-89
- [15] 许晓鸿, 王跃邦, 刘明义, 等. 江河堤防植物护坡技术研究成果推广应用[J]. 中国水土保持, 2002(1): 17-18
- [16] 代全厚, 张力. 嫩江大堤植物根系固土护堤功能研究[J]. 中国水土保持, 1998(12): 36-37
- [17] 李新虎. 生物护坝措施在汾河下游治理中的应用[J]. 山西水利科技, 2004, 154(4): 50-52
- [18] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34-37
- [19] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 北京市森林生态系统土壤保持能力的综合评价[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 240-244
- [20] 郭二辉, 云菲, 冯志培, 等. 河岸带不同植被格局对表层土壤养分分布和迁移特征的影响[J]. 自然资源学报, 2016(7): 1164-1172
- [21] 薛鸥, 魏天兴, 刘飞, 等. 公路边坡植物群落多样性与土壤因子耦合关系[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(1): 91-100
- [22] 谢贤健, 张继. 巨桉人工林下土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 175-179
- [23] 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗蚀性特征及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 100-108
- [24] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 1035-1041
- [25] 闫思宇, 王景燕, 龚伟, 等. 川南山地林分变化对土壤物理性质和抗蚀性的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1112-1120
- [26] 黄进, 杨会, 张金池. 桐庐生态公益林主要林分类型土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 49-52

Comprehensive Evaluation on Recovery of Soil Anti-erodibility by Revetment Vegetation Based on Coupling Relationship Analysis

XIE Xianjian, ZHANG Bin

(School of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641000, China)

Abstract: In order to comprehensively evaluate the effects of revetment vegetation on soil anti-erodibility, the soils under grasslands, shrubs, arbor-grasslands and arbor-shrub-grasslands were selected, the effects of different physiochemical indexes of soil anti-erodibility were analyzed by principal component method, and gray relevant analysis was used to study soil physiochemical indexes and their relation with soil anti-erodibility indexes. Furthermore, a coupling model was constructed to comprehensively evaluate the influence of different revetment vegetation patterns on soil anti-erodibility. The results showed that the main factors of soil anti-erodibility were >0.25 mm water stable aggregate, bulk density, organic matter, alkaline nitrogen, available phosphorus, available potassium, mean weight diameter and water stable index, and >0.25 mm water stable aggregate had the greatest impact on soil anti-erodibility. There was a moderate correlation between mean weight diameter, water stability index and soil physiochemical properties. The correlation from high to low was 0.25mm aggregates > organic matter > alkaline nitrogen > available phosphorus > available potassium > bulk density. The system coupling degree between soil anti-erodibility and physiochemical indexes in different revetment vegetation patterns was weakly coordinated, and the coordination from high to low were arbors-grasslands > arbor-shrub-grasslands > grasslands > shrubs > natural slope. The coordination of arbor-grasslands was moderate while and the others were weak. Furthermore, the result showed that arbor-grasslands were the best combination model of revetment vegetation. The coordination degree between soil anti-erodibility and soil physiochemical indexes could provide scientific references for the improvement of soil structure and anti-erodibility as well as for the preferential selection of revetment vegetation.

Key words: Soil anti-erodibility; Comprehensive evaluation; Coupling relation; Revetment vegetation