

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

谢贤健, 李永飞

(内江师范学院, 地理与资源科学学院, 四川 内江 641000)

摘要: 为揭示耕地退耕成巨桉林后对土壤抗蚀性的影响, 在野外调查和室内分析的基础上, 以紫色土上栽培的6 a生巨桉纯林、巨桉+果树、巨桉+粮食作物及农耕地土壤作为研究对象, 利用主成分方法分析了影响巨桉林土壤抗蚀性的主要理化指标, 同时结合灰色关联度构建了抗蚀性指数—土壤理化性质指标的耦合模型, 对不同巨桉林的抗蚀性进行综合判定。结果表明: 影响土壤抗蚀性的主要因子有 >0.25 mm团聚体含量、容重、有机质、平均重量直径、水稳性指数、有效钾、碱解氮, 其中 >0.25 mm团聚体含量是决定土壤抗蚀性水平的最关键因素; 平均重量直径和水稳性指数与土壤理化性质指标分别属于中等和较强关联, 土壤理化性质对土壤抗蚀性的影响依次为 >0.25 mm团聚体含量 $>$ 碱解氮 $>$ 有效磷 $>$ 有机质 $>$ 有效钾 $>$ 容重; 土壤抗蚀性与土壤理化性质系统的整体耦合水平属于弱协调, 系统耦合协调程度为巨桉纯林(中度协调) $>$ 耕地(弱协调) $>$ 林粮(轻度不协调) $>$ 林果(轻度不协调)。研究结论可为耕地退耕成巨桉林地的土壤抗蚀性评价提供一定的理论依据。

关键词: 巨桉; 紫色土; 抗蚀性; 土壤理化性质; 耦合关联

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0097-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.017

Degree of Coupling Relationship Between Anti-erodibility and Soil Factors of Purple Soil in Different *Eucalyptus grandis* Plantations

XIE Xianjian, LI Yongfei

(School of Geography & Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641000)

Abstract: In order to reveal the influence of anti-erodibility in the cultivated land after returning farmland to forest, based on the field investigation and lab analysis, purple soil samples of 6-year *Eucalyptus grandis* plantations including pure *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus grandis* + grain crops, *Eucalyptus grandis* + fruits and farmlands were chosen as researching materials, the main physical and chemical indexes of soil anti-erodibility were analyzed by using principal component analysis method. Further, the coupling model of soil physical and chemical properties index and anti-erodibility index was built up by grey relational degree, and the corrosion resistance of different *Eucalyptus grandis* plantations was synthetically determined. The results showed that the main factors affecting soil anti-erodibility were >0.25 mm aggregate content, bulk density, organic matter, mean weight diameter, water stability index, available potassium and alkaline hydrolysis nitrogen, and >0.25 mm aggregate content was the most important factor to determine the level of soil anti-erodibility. There was a medium correlation between mean weight diameter and soil physical and chemical property indexes, there was a strong correlation between water stability index and soil physical and chemical property indexes. Effects of soil physical and chemical properties on soil anti-erodibility was followed by >0.25 mm aggregate content $>$ alkaline hydrolysis nitrogen $>$ available phosphorus $>$ organic matter $>$ available potassium $>$ bulk density. The system's overall level of coupling between soil anti-erodibility and soil physical and chemical properties was weak coordination. On a smaller scale, the coordination degree of system coupling was pure *Eucalyptus grandis* (moderate coordination) $>$ farmlands (weak coordination) $>$ *Eucalyptus grandis* + grain crops (mild incoordination) $>$ *Eucalyptus grandis* + fruits (mild incoordination). Above all, the research conclusions could provide some theoretical basis for the evaluation of soil anti-erodibility in the cultivated land after returning farmland to *Eucalyptus grandis* plantations.

Keywords: *Eucalyptus grandis*; purple soil; anti-erodibility; soil physical and chemical properties; coupling relation

土壤抗蚀性是土壤抵抗外营力对其分散和破坏的能力^[1-2]。土壤抗蚀性与土壤本身的理化性质密切相关^[3],土壤的结构、质地、腐殖质含量、吸收性复合体的组成等是决定土壤抗蚀能力的主要因素^[4-5]。研究表明^[6-7],植物通过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的能力。因此,土壤抗蚀性的强弱除了与土壤理化性质等内在因素有关外,还受土地利用方式、植被覆盖类型的影响。闫思宇等^[8]研究发现天然林转变为人工林后土壤物理性质和抗蚀性变差;邱陆旻等^[3]比较了不同林地下土壤的抗蚀性差异,结果表明 5 类林地下土壤抗蚀性强弱的排序为灌木林>松树林>材用竹林>经济林>茶园。总体来看,不同植被覆盖方式下,土壤抗蚀性差异较为显著^[9-10]。

巨桉(*Eucalyptus grandis*)由于具有抵御土壤侵蚀、稳定土壤结构和强固碳的能力,在退耕还林中作为重要的优良速生树种在我国广为栽培^[11]。但随着种植面积不断增加,也出现了一系列的生态环境问题,如地力衰退、土壤抗蚀性下降、生物多样性降低、水土保持能力下降等^[12]。目前关于巨桉林下土壤的抗蚀性研究主要集中在探讨抗蚀性指标如水稳性指数、水稳性团聚体平均重量直径、团聚状况、结构系数等与土壤本身的理化性质指标之间的关系,利用线性回归、计算相关系数等描述方法,将抗蚀性指标与理化性质指标联系起来,进而对比分析巨桉栽培措施、不同理化性质对抗蚀性的影响^[5,13-14]。然而这些研究并未将抗蚀性指标和土壤理化性质指标综合起来探讨,不明确抗蚀性指标和理化性质指标之间相互作用程度,不利于对不同巨桉林下土壤抗蚀性的综合理解。耦合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^[15-16],本文选择 6 a 生巨桉纯林、巨桉+果树、巨桉+粮食作物土壤作为研究对象,农耕地作为对照,采用主成分、灰色关联度分析等方法,分析不同巨桉人工林下土壤的抗蚀性特征,构建抗蚀性指数—土壤理化性质指标的耦合模型,对不同巨桉人工林的抗蚀性进行综合判定,以期为巨桉人工林培育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于四川省内江市东兴区(105°2.044' E, 29°36.783' N),地处川中丘陵区,属中亚热带季风气候,全年平均气温 15~28 °C,1 月均温 6~8 °C,7 月均温 26~28 °C,年降雨量约 1 000 mm,夏季降水量约占全年的 60%,春季约占 17%,冬季仅占 4%,雨热同

期,春夏旱出现频率高;年无霜期约 310 d,年日照时数 1 100~1 300 h^[14]。土壤类型为紫色土(以泥岩和砂岩为主,大部分为钙质胶结,一般含有数量不等的碳酸钙)。土壤有机质含量 1.39~1.52 g/kg,土壤容重 1.31~1.53 g/cm³。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择和样品采集 于 2014 年 11 月进行野外采样,选择 6 a 生巨桉纯林、巨桉+果树、巨桉+粮食作物土壤作为研究对象,农耕地作为对照;3 种林地类型均为退耕地,坡度 5°~8°;其中巨桉纯林密度为 1 600 株/hm²,林下枯枝落叶层厚约 2 cm,林下植被主要为菊科、禾本科、三叶草、莎草科等植物;林粮模式中巨桉密度为 1 450 株/hm²,套种玉米;林果模式中巨桉密度为 1 350 株/hm²,套种柑橘。在每种样地内设置 10 m×10 m 采样单元,避开河边、林边、以及其他特殊地点,以“S”型设定 4 个样点,挖开一个 1 m×1 m 的长方形,深度大于 20 cm 的剖面,进行采样,约 2 kg,共采集 16 个样品。在采集和运输过程中尽量减少对土样的扰动,以免破坏团聚体。实验室内风干土样,然后沿土壤结构的自然剖面掰分成小团块,剔除石块和动植物残体备用。样品室内分析测试于 2014 年 12 月完成。

1.2.2 土壤理化指标测定方法 团聚体湿筛法:取土样 200 g,将其放置在团粒分析仪上,孔径分别为 5,2,1,0.5,0.25 mm。调整桶内水面的高度,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,并烘干称量,计算其在土样中的质量百分含量。

土壤抗蚀性测定,采用静水崩解法^[14],选取直径为>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 记录崩解的土粒数,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,土壤有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^[8]:

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

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重量百分比。

(2)水稳性分析。水稳性指数计算公式为^[5]:

$$K=\frac{\sum P_i K_i+P_i}{A} \tag{2}$$

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

(3)土壤抗蚀性评价指标的选择。本研究选取>0.25 mm 大团聚体含量(x_1)、容重(x_2)、有机质(x_3)、碱解氮(x_4)、有效磷(x_5)、有效钾(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,采用主成分分析方法比较得出影响土壤抗蚀性的主要影响因子。

(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。关联系数为公式(3):

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

式中: $\xi_i(j)(k)$ 为不同巨桉林的第 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; $Z_i^-(k)$ 和 $Z_j^-(k)$ 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。

将不同巨桉林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^[15];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。

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

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

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。

为定量比较不同巨桉林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:

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

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

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($p<0.05$);用 DPS 软件计算灰色关联度。

2 结果与分析

2.1 土壤水稳性团聚体组成及抗蚀性指标的差异性分析

不同粒径的团聚体对土壤养分的影响具有显著差异^[18],进而影响土壤结构的稳定性和抗蚀性,而不同的植被覆盖方式对土壤粒径的形成具有一定的影响^[14]。对表 1 中水稳性团聚体粒径组成作方差分析, $F_{0.05}=3.53>F_{\text{临界}}=2.77$, $p=0.02$,说明不同植被覆盖方式对土壤粒径的形成影响差异显著。本研究中,不同植被覆盖方式下土壤团聚体的含量总体趋势表现为随粒径的减小呈先减小后增加的趋势,不同植被覆盖方式的土壤结构中占主导地位的粒径不同,巨桉纯林和耕地为>5 mm 的团聚体含量较多,林果和林粮为<0.25 mm 的团聚体含量较多。

表 1 土壤抗蚀性指标

植被覆盖 模式	土壤水稳性团聚体含量/%							容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	有效钾/ (mg·kg ⁻¹)	MWD/ mm	K
	>5	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	<0.25	≥0.25							
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm							
纯林	50.63	18.13	11.05	6.75	3.71	9.74	90.27a	1.31c	1.52a	20.02ab	35.10b	69.30c	4.69b	0.36a
林果	8.69	8.31	8.15	16.85	17.01	40.99	59.01c	1.53a	1.36d	19.54b	29.46c	78.52a	1.36d	0.19c
林粮	25.53	11.25	6.91	9.05	8.19	39.07	60.93c	1.44b	1.39c	11.33c	23.39d	68.54c	2.61c	0.15d
耕地	54.12	13.92	6.10	6.91	6.20	12.76	87.25b	1.35c	1.45b	21.69a	61.98a	75.67b	4.74a	0.24b

注:同列中不同小写字母表示不同处理差异显著($p<0.05$)。

大团聚体是微团聚体通过有机质胶结而成,是土壤表层中有机质含量较高的组成部分,稳定性强,是土壤肥力的重要物质基础^[19]。由表 1 分析可知,>

0.25 mm 水稳性团聚体含量大小顺序为巨桉纯林>耕地>林粮>林果。利用 Duncan 法,比较分析不同植被覆盖方式下>0.25 mm 的团聚体含量差异,巨

桉纯林、耕地与林果、林粮之间差异显著,林果、林粮之间差异不显著,这说明巨桉纯林和耕地有利于土壤大团聚体的形成。究其原因,巨桉纯林不存在人为翻耕扰动,同时地表枯枝落叶分解转化为有机质有利于土壤大团聚体的形成;耕地、林果、林粮在植物栽培过程中人为翻耕扰动对土壤结构的破坏较大,不利于土壤大团聚体的形成;另一方面耕地有机肥的施用多于林果、林粮,利于大团聚体的形成,因此耕地的土壤大团聚体要多于林果、林粮。

土壤的体积质量增加可导致土壤稳定性恶化及土壤抗侵蚀的能力减弱^[14]。本研究中,容重的大小顺序为林果>林粮>耕地>巨桉纯林,耕地、巨桉纯林之间差异不显著,其他植被覆盖方式差异显著,说明减少人为扰动和增加土壤的有机质含量可以促进容重减小,有利于形成良好的土壤结构和增强土壤抗侵蚀的能力。

土壤有机质对水稳性团聚体的形成和稳定性具有重要影响的作用,可以表征土壤结构的稳定性^[18]。本研究中,有机质含量的大小顺序为巨桉纯林>耕地>林粮>林果,不同植被覆盖方式之间差异显著,说明在减少人为扰动的情况下,巨桉栽培有利于土壤有机质的形成。

土壤碱解氮、有效磷、有效钾在团聚体中的保持、供应及转化能力存在差异,其含量的高低直接关系到土壤结构的良好与否^[20]。本研究中,3种速效养分的含量大小顺序均表现为耕地>巨桉纯林>林果>林粮;碱解氮含量在耕地和巨桉纯林之间差异不显著,在巨桉纯林和林果之间差异不显著,在其他植被覆盖方式之间差异显著;有效磷含量在4种植被覆盖方式之间差异显著;有效钾含量林粮和巨桉纯林之间差异不显著,在其他植被覆盖方式之间差异显著;除碱解氮含量外,耕地中速效养分显著高于其他3种植被覆盖方式,其原因是巨桉纯林扰动小,土表枯枝落叶中有机质的分解可提高碱解氮的含量,另一方面,耕地在植物栽培过程中长期施用化肥,导致速效养分显著高于其他植被覆盖方式。

平均重量直径可以表征土壤团聚体的团聚度,其

值越大,土壤结构越稳定,土壤抗蚀性越强^[8]。本研究中,平均重量直径的大小顺序为耕地>巨桉纯林>林粮>林果,4种植被覆盖方式之间差异显著,说明耕地在退耕成林地后对土壤的结构有显著影响,林果、林粮覆盖方式下巨桉本身对地力消耗大,加之人为翻耕扰动加强,不利于土壤形成稳定的团聚体结构,这与巨桉纯林和耕地>5 mm的团聚体含量较多,林果和林粮<0.25 mm团聚体含量较多的结论相一致。

水稳性指数反映了土壤团聚体在静水中分散、崩解的程度,其值越大,土壤团聚体越稳定,土壤抗蚀性越强^[14]。本研究中,水稳性指数的大小顺序为巨桉纯林>耕地>林果>林粮,4种植被覆盖方式之间差异显著,说明耕地退耕成林地后减少人为扰动可以显著增强土壤的抗蚀性。然而,耕地的水稳性指数仍显著大于林果、林粮,可能的原因是林果、林粮覆盖方式下巨桉本身对地力消耗大以及有机肥和速效肥料的施用耕地显著多于林果、林粮,从而有利于耕地形成较好的土壤结构。

2.2 土壤抗蚀性评价指标的主成分分析

土壤抗蚀性强弱是表层土壤理化性质的综合反映,受到多指标因素的影响,各指标之间通过相互作用,对土壤抗蚀性的解释存在重叠效应^[8]。因此,需要对多个指标进行综合分析,从而揭示不同巨桉林间土壤抗蚀性能的差异及抗蚀性指标对抗蚀性能的贡献。本研究采用主成分分析方法,对8个影响土壤抗蚀性的指数指标和理化性质指标进行主成分提取,前2个主成分特征值大于1,累计贡献率达91.800%,说明这2个主成分基本能反映不同巨桉林土壤抗蚀性的全部信息。在第1主成分中,>0.25 mm团聚体含量、容重、有机质、MWD、K的载荷值较大,在第2主成分中,有效钾和碱解氮的载荷值较大;其中,除容重载荷值为负外,其他指标载荷值均为正值,说明土壤容重越大,土壤的抗蚀性越弱,其他指标值越大,土壤抗蚀性越强;所有指标中,>0.25 mm团聚体含量的载荷值最大,说明水稳性大团聚体对土壤抗蚀性能的贡献度最强,以水稳性团聚体为基础的指标能很好地评价土壤抗蚀性,这与闫思宇等^[8]的研究结论相一致。

表 2 土壤抗蚀性指标的主成分分析

抗蚀性指标	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	特征根	贡献率/%	累计贡献率/%
第1主成分	0.998	-0.952	0.954	0.593	0.645	-0.256	0.962	0.872	5.331	66.639	66.639
第2主成分	0.058	0.269	-0.250	0.757	0.600	0.963	-0.105	-0.059	2.013	25.161	91.800

2.3 土壤抗蚀性指数指标和理化性质指标关联度分析

根据灰色关联度计算公式,得到土壤抗蚀性指标间的关联矩阵(表3),各指标关联度值介于0.413~0.794,均值为0.626,属于中等和较强关联,表明不同植被覆盖类型下土壤抗蚀性指数指标和理化性质

指标间有较强的耦合作用,二者联系和反馈较紧密。根据公式(4)和公式(5),计算得到土壤理化性质指标对土壤抗蚀性指数指标影响的关联度平均值,以及土壤抗蚀性指数指标对土壤理化性质指标影响的关联度平均值,分析土壤理化性质指标对土壤抗蚀性指数指

标的主要作用因素和土壤抗蚀性指数指标对土壤理化性质指标的反馈作用,以及两者相互耦合的主要关系。

由表 3 可知,平均重量直径和水稳性指数对土壤理化性质指标反馈作用较为明显,平均关联系数分别为 0.567 和 0.671,平均重量直径与土壤理化性质指标属于中等关联,水稳性指数与土壤理化性质指标属于较强关联;换言之,土壤理化性质指标对水稳性指数的影响要强于平均重量直径。平均重量直径和水稳性指数与 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体关联系数最大,分别为 0.658 和 0.794,这一结果与主成分分析中 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量的载荷值最大,水稳性大团聚体对土壤抗蚀性能的贡献度最强的结论相一致,说明水稳性大团聚体是影响土壤抗蚀性强弱的关键理化性质指标。土壤理化性质指标与平均重量直径和水稳性指数的平均关联系数依次为 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量(0.726) $>$ 碱解氮(0.699) $>$ 有效磷(0.650) $>$ 有机质(0.629) $>$ 有效钾(0.578) $>$ 容重(0.428),属于中等和较强关联,与主成分分析中得到的影响土壤抗蚀性的主要理化指标结论基本一致;本研究中,紫色土为石灰性紫色土,土质疏松,氮、磷含量低,在降水作用下,速效氮、磷养分容易流失,而巨桉生长过程中消耗大量氮、磷速效养分,紫色土中碱解氮、有效磷的匮乏将影响到良好土壤结构的形成,进而影响土壤抗蚀性,因此碱解氮、有效磷与土壤抗蚀性有较强的关联性;另一方面,土壤有机质分解后可以提高土壤中速效养分的含量,其释放是一个相对缓慢的过程,对良好土壤结构的形成具有一定的时间效应,而速效养分对土壤结构起直接影响作用,本研究中,耕地、林粮、林果长期施用含氮、磷等速效养分的化肥,因此碱解氮和有效磷与抗蚀性指数指标的关联系数平均值要大于有机质,进一步说明了土壤抗蚀性指标之间相互作用,具有重叠效应。

表 3 综合指标和理化指标的耦合矩阵

关联度	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	平均值
x_7	0.658	0.413	0.573	0.631	0.603	0.512	0.567
x_8	0.794	0.442	0.684	0.766	0.697	0.644	0.671
平均值	0.726	0.428	0.629	0.699	0.650	0.578	0.626

2.4 土壤抗蚀性指数指标和理化指标耦合度分析

研究表明,土壤的理化性质指标与表征土壤抗蚀性的指数(如平均重量直径、水稳性指数等)有显著的正负相关关系^[8,14],因而研究者通常用单一的抗蚀性指数来评价不同植被覆盖方式下土壤的抗蚀性水平,或者将理化性质指标和抗蚀性指数作为抗蚀性评价因子,采用综合评价方法计算抗蚀性综合指数,从而比较不同植被覆盖方式下土壤的抗蚀性综合水平。然而这些评价方法并未考虑理化性质指标与抗蚀性指数之间的相互作用程度和耦合关联性,不利于综合理解不同植被覆盖方式下的土壤抗蚀性。因此本研

究根据耦合度模型,计算得到不同植被覆盖方式土壤理化性质指标和土壤抗蚀性指数指标间的耦合协调程度(表 4)。不同植被覆盖方式的土壤抗蚀性耦合度介于 0.53~0.75,平均耦合度为 0.63,系统整体水平属于弱协调,说明土壤抗蚀性与土壤理化性质并未达到最佳的协同状态,其原因可能是巨桉本身对肥力要求很高,加之林果、林粮、耕地在植物栽培过程中表土受到翻耕扰动的影响,不利于良好土壤结构的形成,因而抗蚀性能和土壤理化因子之间耦合协调程度不高。具体来看,不同植被覆盖方式的系统耦合协调程度按 C 值的排序为:巨桉纯林 $>$ 耕地 $>$ 林粮 $>$ 林果。巨桉纯林属于中度协调,其大团聚体含量、有机质含量、速效养分和容重都要显著高于或低于林粮和林果,表现为土壤抗蚀性指数(平均重量直径、水稳性指数)显著大于林果、林粮,说明耕地在退耕成巨桉纯林后,减少人为扰动对土壤结构的破坏,有利于土壤大团聚体的形成和土壤肥力的提高,同时有助于改善土壤紧实度,使容重减小,从而使土壤抗蚀性能和土壤理化性质稳步改善,协调发展。耕地退耕成林果、林粮后,巨桉本身消耗地力较大、加之人为翻耕扰动因素的存在,导致系统耦合协调程度进一步下降。

表 4 不同植被覆盖方式土壤抗蚀性综合指标和理化指标系统耦合协调度

植被覆盖模式	耦合度	协调类型
纯林	0.75	中度协调
林果	0.53	轻度不协调
林粮	0.57	轻度不协调
耕地	0.65	弱协调

3 结论

(1)土壤抗蚀性受土壤理化指标等多因素的影响,通过主成分和关联度分析发现 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量、容重、有机质、平均重量直径、水稳性指数、有效钾、碱解氮是影响土壤抗蚀性的主要因子,其中 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量是决定土壤抗蚀性水平的关键因素。

(2)从整体上来看,平均重量直径与土壤理化性质指标属于中等关联,水稳性指数与土壤理化性质指标属于较强关联;土壤理化性质对土壤抗蚀性的影响依次为 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量 $>$ 碱解氮 $>$ 有效磷 $>$ 有机质 $>$ 有效钾 $>$ 容重。

(3)不同植被覆盖方式土壤抗蚀性与土壤理化性质的系统整体耦合水平属于弱协调,并未达到最佳的协同状态;系统耦合协调程度巨桉纯林 $>$ 耕地 $>$ 林粮 $>$ 林果,巨桉纯林属于中度协调,耕地属于弱协调,林果、林粮属于轻度不协调。在耕地退耕成巨桉林地的过程中,应减少人为因素对土层的翻耕扰动,同时注重有机肥料和速效肥料的施用,改善土壤结构,从而提高土壤的抗蚀性能,使巨桉林地系统的抗蚀性与土壤

理化性质协同发展。耦合分析考虑了土壤抗蚀性指数和理化性质之间的相互作用程度和耦合关联性,有利于对不同植被覆盖方式下的土壤抗蚀性进行综合理解,为不同植被覆盖方式下土壤的抗蚀性综合评价提供了科学的理论依据。

参考文献:

- [1] 吴丽丽,张仁陟,康立军.紫色丘陵区坡耕地生物埂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] 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.
- [3] 邱陆昉,张丽萍,陆芳春,等.基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析[J].水土保持学报,2016,30(4):74-79.
- [4] 任改,张洪江,程金花,等.重庆四面山几种人工林地土壤抗蚀性分析[J].水土保持学报,2009,23(3):20-24.
- [5] 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.
- [6] 潘树林,辜彬,杨晓亮.土壤抗蚀性及评价研究进展[J].宜宾学院学报,2011,11(12):101-104.
- [7] 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.
- [8] 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):1112-1119.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Manning A D, Fischer J, Lindenmayer D B. Scattered trees are keystone structures-implications for conservation[J]. Biological Conservation, 2006, 132(3):311-321.
- [12] 石薇,龚伟,胡庭兴.自然林及坡耕地转变为巨桉林后土壤抗蚀性变化[J].四川林业科技,2011,32(3):18-22.
- [13] 涂淑萍,周桂香,郭晓敏,等.赣县稀土采矿区巨桉林地土壤抗蚀性评价[J].林业科学研究,2013,26(6):75-758.
- [14] 谢贤健,韩光中.不同巨桉人工林土壤分形特征及抗蚀性分析[J].土壤,2014,46(4):725-731.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Song H W, Lu S M. Study on repairing permanent transportation roadway in deep mining by bolt-shotcrete and mesh supporting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 9(2):167-171.
- [18] 谢贤健.不同巨桉人工林对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):211-215,225.
- [19] 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.
- [20] 刘中良,宇万太,周桦,等.长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响[J].土壤,2011,43(5):720-728.
- [26] 卢肇钧,张惠明,陈建华,等.非饱和土的抗剪强度与膨胀压力[J].岩土工程学报,1992,14(3):1-8.
- [27] 李叔南,曾令军,漆玉邦,等.西南红壤和黄壤粘粒的矿物特性[J].四川农业大学学报,1990,8(2):108-114.
- [28] 王中文,洪宝宁,刘鑫,等.红粘土抗剪强度的水敏性研究[J].四川大学学报(工程科学版),2011,43(1):17-22.
- [29] Perfect E, McLaughlin N B, Kay B D, et al. An improved fractal equation for the soil water retention curve[J]. Water Resources Research, 1996, 32(2):281-288.
- [30] Lei T W, Zhang Q W, Yan L J, et al. A rational method for estimating erodibility and critical shear stress of an eroding rill[J]. Geoderma, 2008, 144(3):628-633.
- [31] Zhang G H, Liu G B, Tang K M, et al. Flow detachment of soils under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. Transactions of the ASAE, 2008, 51(3):883-890.
- [32] Collison A, Simon A. Modeling gully head-cut recession processes in loess deposits[C]//Ascough J C, et al. Soil erosion research for the 21st century: Proceedings of the international symposium. Honolulu, Hawaii, Saint. Joseph, 2001:87-90.
- [33] 王彬.东北典型薄层黑土区土壤可蚀性关键因子分析与土壤可蚀性计算[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2009.

(上接第 96 页)