

宁南山区坡面不同土地利用方式下植被—土壤耦合关系评价

白一茹^{1,2}, 阮晓晗^{1,2}, 包维斌^{1,2}, 王幼奇^{1,2}, 夏子书^{1,2}, 杨帆^{1,2}

(1.宁夏大学 资源环境学院, 银川 750021; 2.旱区特色资源与环境治理教育部国际合作联合实验室, 银川 750021)

摘 要:为实现宁南山区生态环境可持续发展,避免出现土壤干化及植被退化现象,以彭阳县王洼水土保持试验站坡面不同土地利用方式植被—土壤为研究对象,通过建立以 11 个植被因子和 14 个土壤因子为主的 2 级指标体系,采用层次分析法(AHP)和熵权法确定各植被、土壤因子的权重,以耦合、协调度模型评价二者间的协调程度,并用典型相关分析(CCA)确定了各因子之间的相关性。结果表明:林地、灌木地、弃耕地、草地和农地的协调度(D_c)值分别为 0.446 0, 0.451 5, 0.505 9, 0.531 2, 0.604 6, 植被—土壤耦合协调程度 $S(x)/P(y)$ 的值分别为 0.490 8, 0.593 4, 0.821 2, 0.874 3, 1.187 4, 即林地和灌木、弃耕地和草地、农地分别属于濒临失调、勉强协调、初级协调状态;濒临失调发展模式主要分布于坡面东北和西南部,勉强协调发展模式分布于坡面中西部,初级协调发展模式零碎状分布;CCA 分析表明土壤系统中干燥化指数、水分亏缺指数、平均含水量、黏粒、容重等对植被系统的影响较大。综上,宁南山区农地、草地的耦合协调度优于林地、灌木地,合理的林草植被选取和搭配可确保区域植被—土壤系统的协调发展。

关键词:宁南山区; 土壤干燥化; 植被; 耦合

中图分类号: S154.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)04-0251-08

Evaluation on Coupling of Vegetation and Soil on Slopes of Mountain Area in Southern Ningxia

BAI Yiru^{1,2}, RUAN Xiaohan^{1,2}, BAO Weibin^{1,2}, WANG Youqi^{1,2}, XIA Zishu^{1,2}, YANG Fan^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.Arid Area Characteristic Resources and Environmental Governance Department of Education International Cooperation Joint Laboratory, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The purpose of the study is to realize the sustainable development of ecological environment and avoid the phenomenon of soil drying and vegetation degradation in the mountainous areas of southern Ningxia. Taking different land use types as research objects, we used AHP and entropy weight method to determine the weight of each soil and vegetation factor by establishing a two-level index system mainly composed of 11 vegetation factors and 14 soil factors. The coupling degree and coordination model were used to evaluate the degree of coupling and coordination between the vegetation and soil, and the CCA was used to analyze the correlation between the soil and vegetation factors. The results of the study showed that the D_c values of forest land, irrigated land, abandoned arable land, grassland and agricultural land were 0.446 0, 0.451 5, 0.505 9, 0.531 2 and 0.6 046, respectively, and the $S(x)/P(y)$ values were 0.490 8, 0.593 4, 0.821 2, 0.874 3 and 1.187 4, respectively, which indicated that forest land and shrub were in imminent imbalance state, abandoned farmland and grassland were barely coordinated, and agricultural land was in primary coordinated state; the imminent imbalanced development model mainly distributed in the northeast and southwest, the barely coordinated development model distributed in the central and western regions, and primary coordinated development model scattered across the region. The CCA analysis showed that the soil desiccation index, relative moisture deficit index, average water content, clay content and bulk density had great influence on vegetation system. In summary, the results indicated that the coupling coordination degrees of farmland and grassland were better than those of woodland and shrub land in the mountainous area of southern Ningxia.

收稿日期: 2020-08-13

修回日期: 2020-08-30

资助项目: 宁夏自然科学基金(2020AAC03049); 国家自然科学基金(41761049, 41867003); 宁夏环境保护科学技术研究项目(2018-007)

第一作者: 白一茹(1984—), 女, 陕西渭南人, 博士, 副教授, 主要从事旱区环境变化研究。E-mail: yr0823@163.com

通信作者: 王幼奇(1980—), 男, 安徽泾县人, 博士, 副教授, 主要从事旱区环境变化研究。E-mail: wyq0563@163.com

Reasonable selection and collocation of forest and grass vegetation can ensure the coordinated development of regional vegetation-soil system.

Keywords: mountain areas of southern Ningxia; soil desiccation; vegetation; coupling

坡面是黄土高原地区主要的地形单元,其植被群落恢复演替过程的实质是植物与土壤系统间相互作用的过程^[1-2],植被—土壤系统的协调程度对增加植被盖度、优化植被群落结构、减少水土流失和稳定生态系统等具有重要意义^[3-4]。自“六五”以来,宁南山区陆续实施了以人工林(草)建设和整地工程等为主要措施的退耕还林(草)、林业资源保护、小流域综合治理工程等一系列生态环境保护和恢复措施,使宁南山区森林覆盖率由 20 世纪 80 年代不足年 3% 提高到当前的 13% 以上,水土流失面积也下降了 50%,取得了显著的生态和经济效益。但近些年该区域的人工林(草)出现了一些退化现象,甚至在种植密度大的坡地上出现了枯萎和死亡的现象^[5]。因此,针对宁南山区坡面不同土地利用方式下的植被—土壤系统耦合关系研究,对于指导研究区植被恢复、生态环境建设和高效合理利用水土资源有重要作用^[6]。

耦合是指两个及以上的生态系统之间相互作用的现象,反映着生态系统中各要素的相互转化和相互依存的关系^[7-8],耦合协调度模型主要用于衡量生态系统的一致性和协调性程度^[9-11]。关于植被—土壤系统耦合关系评价的研究中,一般植被系统中选取的指标包括植物多样性指数、生物量、盖度和养分含量等,土壤系统中选取的指标包括土壤容重、毛管孔隙度和养分等^[12],在构建上述指标体系的基础上,分别对植被和土壤系统选取的指标进行加权求和,利用耦合度模型和协调度模型对植被—土壤系统的耦合协调度进行评价^[13]。徐明等^[10]利用耦合协调度模型发现黄土丘陵区沟谷地不同植被恢复模式下的植被—土壤系统基本处于中级协调发展水平。李豪等^[14]利用耦合协调度模型对陕北 5 种微地形下植被—土壤系统进行分析,发现在生态恢复重建过程应充分考虑地形条件。彭晚霞等^[15]在喀斯特地区利用耦合协调度模型分析常绿落叶阔叶混交林植物与土壤地形因子系统,发现该区域景观异质性强、土壤养分状况好、物种丰富。综上可知耦合协调度模型能很好地评价各种区域、地形和气候类型条件下的植被—土壤间的耦合关系。

宁南山区属半干旱半湿润区,年均降水量 400 mm 左右且分布不均,地形复杂,该区域林(草)植被耗水量大,降水和土壤水分已不能满足植被生长的需求,出现了土壤干燥化和干层现象,导致部分植被衰退、枯萎甚至死亡的现象^[16-17]。因此,本研究在已有的植物—土壤

系统指标体系的基础上,在土壤体系中增加了土壤干层厚度、干燥化指数、水分相对亏缺指数等土壤水分指标,建立以 11 个植被因子和 14 个土壤因子为主的 2 级指标体系,采用 AHP 法和改进熵权法确定各植被—土壤因子的权重,以耦合协调度模型评价二者间的关系,揭示宁南山区坡面植被—土壤生态系统耦合协调状况及各因子之间的相关性,为研究区植被恢复、重建,生态可持续发展提供可借鉴依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究样地位于宁夏南部的彭阳县王洼水保试验站(106°32′—106°58′E,35°41′—36°17′N),属黄土丘陵沟壑区,气候属温带半湿润半干旱气候,年均气温约 7.9℃,年均降水量 450 mm,且 75% 集中在 6—9 月,多年平均水面蒸发量 1 050 mm,无霜期 140~170 d。土壤黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 7.78%,73.93%,30.36%,属黄绵土。土壤总孔隙度、饱和导水率、饱和含水量、毛管孔隙度分别为 58.14%,0.24 mm/min,48.91%,28.58%。土壤全氮、有机质、全钾、全磷、pH 值、电导率分别为 1.04 g/kg,11.13 g/kg,17.55 g/kg,0.06 g/kg,8.36,115.59 μs/cm。图 1 为坡面土地利用类型分布图。调查样区内物种基本信息见表 1。

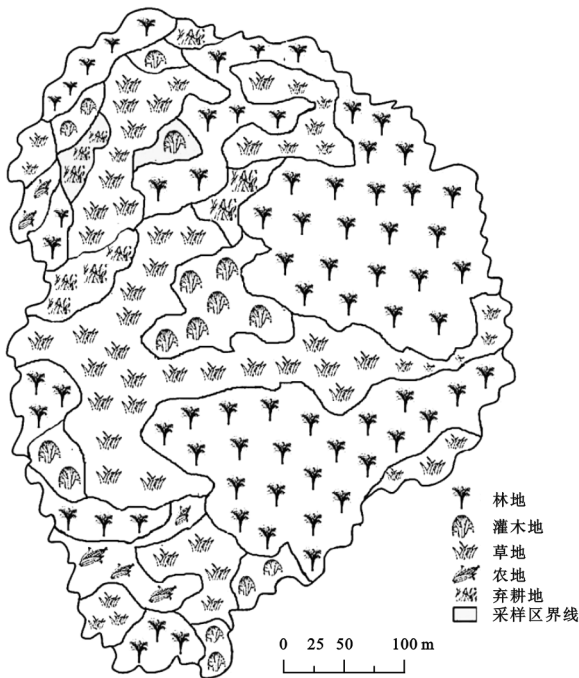


图 1 研究区坡面土地利用方式

表 1 调查样区内物种基本信息

物种	科	属	生活型
芒草(<i>Miscanthus sinensis</i>)	禾本科	芒属	PH
铁杆蒿(<i>Artemisia sacrorum</i>)	菊科	蒿属	PH
百里香(<i>Thymus mongolicus</i>)	唇形科	百里香属	PH
猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i>)	菊科	蒿属	PH
冰草(<i>Agropyron mongolicum</i>)	禾本科	冰草属	PH
胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)	豆科	胡枝子属	Sh
冷蒿(<i>Artemisia frigida</i>)	菊科	蒿属	PH
柠条(<i>Caragana korshinskii</i>)	豆科	锦鸡儿属	Sh
委陵菜(<i>Potentilla chinensis</i>)	蔷薇科	委陵菜属	PH
长芒草(<i>Stipa bungeana</i>)	禾本科	针茅属	PH
赖草(<i>Leymus secalinus</i>)	禾本科	赖草属	PH
枸杞(<i>Lycium barbarum</i>)	茄科	枸杞属	Sh
蕤核(<i>Prinsepia uniflora</i>)	蔷薇科	扁核木属	Sh
互叶醉鱼草(<i>Buddleja alternifolia</i>)	马钱科	醉鱼草属	Sh
苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)	豆科	苜蓿属	PH
白羊草(<i>Leymus chinensis</i>)	禾本科	高粱族	PH
糙隐子草(<i>Cleistogenes squarrosa</i>)	禾本科	隐子草属	PH
狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)	禾本科	狗尾草属	AH
大针茅(<i>Stipa grandis</i>)	禾本科	针茅属	PH
阿尔泰狗娃花(<i>Heteropappus altaicus</i>)	菊科	狗娃花属	PH
黄花棘豆(<i>Oxytropis ochrocephala</i>)	豆科	棘豆属	PH
狼毒(<i>Stellera chamaejasme</i>)	瑞香科	狼毒属	Li
马铃薯(<i>Solanum tuberosum</i>)	茄科	茄属	AH
独行菜(<i>Lepidium sativum</i>)	十字花科	独行菜属	BH
田旋花(<i>Convolvulus arvensis</i>)	旋花科	旋花属	PH
野枯草(<i>Arundinella hirta</i>)	禾本科	野枯草属	PH
牻牛儿苗(<i>Erodium stephanianum</i>)	牻牛儿苗科	牻牛儿苗属	PH
车前(<i>Plantago asiatica</i>)	车前科	车前属	BH
蒲公英(<i>Taraxacum mongolicum</i>)	菊科	蒲公英属	PH
艾(<i>Artemisia argyi</i>)	菊科	蒿属	PH
甘草(<i>Glycyrrhizia uralensis</i>)	豆科	甘草属	PH
沙打旺(<i>Astragalus adsurgens</i>)	豆科	黄芪属	PH
沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i>)	胡颓子科	沙棘属	Sh
刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)	豆科	刺槐属	Ar
草木樨(<i>Melilotus suaveolena</i>)	草木樨	草木樨属	BH
野菊花(<i>Chrysanthemum indicum</i>)	菊科	菊属	PH
蓟(<i>Cirsium segetum</i>)	菊科	蓟属	PH
骆驼蓬(<i>Peganum harmala</i>)	蒺藜科	骆驼蓬属	PH
杨树(<i>Populus davidiana</i>)	杨柳科	杨属	Ar
柳树(<i>Salix matsudana</i>)	杨柳科	柳属	Ar
榆树(<i>Ulmus pumila</i>)	榆科	榆属	Ar
云杉(<i>Picea crassifolia</i>)	松科	云杉属	Ar
山桃(<i>Prunus davidiana</i>)	蔷薇科	桃属	Ar
山杏(<i>Armeniaca sibirica</i>)	蔷薇科	杏属	Ar
玉米(<i>Zea mays</i>)	禾本科	玉蜀黍属	AH
黄芩(<i>Scutellaria baicalensis</i>)	唇形科	黄芩属	PH
核桃(<i>Juglans regia</i>)	胡桃科	胡桃属	Ar
鼠尾粟(<i>Sporobolus fertilis</i>)	禾本科	鼠尾粟属	PH
向日葵(<i>Helianthus annuus</i>)	菊科	向日葵属	AH
地锦(<i>Euphorbia humifusa</i>)	大戟科	大戟属	AH
芨芨草(<i>Achnatherum splendens</i>)	禾本科	芨芨草属	PH

注:AH 为一年生草本;BH 为二年生草本;PH 为多年生草本;Sh 为灌木;Ar 为乔木;Li 为藤木。

1.2 试验设计和测定方法

1.2.1 样地布设 2018 年 7 月—8 月,在实际调查研究的基础上,选择典型坡面布设样方 109 个(图 1)。乔木层使用 10.0 m×10.0 m 样方,同时在乔木层样方四角和中心各设 1.0 m×1.0 m 样方对草本植物进行多样性调查;灌木层使用 5.0 m×5.0 m 的样方,同时在灌木层样方四角和中心各设 1.0 m×1.0 m 样方对草本植物进行多样性调查;草本层使用 1.0 m×1.0 m 的样方。

1.2.2 物种调查与计算方法 记录调查样方位置信息、样方内植物种类、数量、盖度、胸径、株高、频度等。同时使用高枝剪及手工采取植物的叶片,以供植物样品叶片养分含量测定。重铬酸钾—外加加热法测定 C 含量,H₂SO₄—H₂O₂消煮后测定 N,P 含量,凯氏定氮法测 N 含量,钒钼黄比色法测定 P 含量,火焰光度计法测定 K 含量^[18]。乔木植被生物量由 $B=\alpha_0+\alpha_1x_1+\cdots+\alpha_ix_i+\epsilon$ 生物量模型模拟得出,式中: B 为生物量; x_1,x_2,\cdots,x_i 为植被的株高、冠幅、胸径及盖度等植株形态学变量; $\alpha_0,\alpha_1,\cdots,\alpha_i$ 为模型参数; ϵ 为误差项;灌木植被采取剪下 3 支树枝后数出整个灌木树枝总支数,并且换算成剪下 3 支树枝的倍数,称取剪下的 3 个树枝生物量计算其平均值,最后推算整株灌木生物量^[19]。草地生物量采取割取草方格全部草本植物进行称重。采用米尺和卷尺等测定植物冠幅、胸径和株高。采用统计的植物相对密度(Hd)、相对高度(Hr)、相对频度(Fr)、相对盖度(Cr)来计算物种的重要值(P)、丰富度指数(R)、多样性指数(H)和优势度指数(C)^[19]。

乔木的重要值(P):

$$P=(Hd+Hr+Fr)/3\times 100\%$$
 (1)

灌木、草本的重要值(P):

$$P=(Hr+Cr+Fr)/3\times 100\%$$
 (2)

丰富度指数(R):

$$R=S$$
 (3)

多样性指数(H):

$$H=-\sum P_i\ln P_i$$
 (4)

优势度指数(C):

$$C=\sum P_i^2$$
 (5)

式中: S 为每个群落中植被的物种数; P_i 为第 i 种物种的重要值。

1.2.3 土壤样品采集与分析 每个样方调查完毕后,采用直径 5 cm 的土钻分层采取 109 个样方 0—600 cm 土壤样品,其中 0—100 cm 每 10 cm 取样一次,100—600 cm 每 20 cm 取样一次,即每个样点采集土样 35 个,研究区总共采集 3 815 个样本。同时,将各土样分别装满分层编号的铝盒和自封袋中,用于土壤含水量和基本理化性质的测定。在每个样点附

近使用环刀采集 0—20 cm 的原装土样品,共采集 109 个原装土样品,用于土壤容重、饱和含水量和孔隙度等基本物理性质测定。采用标准烘干法测定土壤含水量;环刀法测定土壤容重、饱和含水量、毛管孔隙度^[20];激光粒度仪—马尔文法(MS3000)测定土壤质地,按美国制进行分类;重铬酸钾外加热法测定 C 含量、凯氏定氮法测定 N 含量、钼锑抗比色法测定 P 含量、火焰光度计法测定 K 含量^[21]。

土壤含水量:

$$SMC_i = \frac{G_i - G_j}{G_j - G} \times 100\% \quad (6)$$

式中:SMC_i为不同土地类型第*i*土层土壤含水量(%),*i*为采样土层深度;*G_i*为不同土地类型第*i*土层铝盒与湿土质量(g);*G_j*为对应第*i*土层的铝盒与干土质量(g);*G*为空铝盒质量(g)。

土壤水分相对亏缺指数:

$$CSWDI_i = \frac{CP_i - SMC_i}{CP_i - WM_i} \quad (7)$$

式中:CSWDI_i为不同土地类型第*i*层土壤水分相对亏缺指数;*i*为采样土层深度;*CP_i*为对对照地农田第*i*层土壤含水量(%);SMC_i为不同土地类型第*i*层土壤含水量(%);WM_i为第*i*层凋萎含水量。

土壤干燥化指数:

$$SDI_i = \frac{SMC_i - WM_i}{SSM_i - WM_i} \times 100\% \quad (8)$$

式中:SDI_i为不同土地利用类型第*i*层土壤干燥化指数;SSM_i为第*i*层土壤稳定含水量。

干层起始深度是垂直剖面上土壤含水量开始小于土壤稳定含水量的土层深度(cm);干层厚度是垂直剖面上所有土壤含水量小于土壤稳定含水量的土层范围总和(cm)^[22]。

1.3 耦合度、协调度模型

1.3.1 数据标准化 在计算各指标权重时考虑到各指标体系的单位不一致,无法直接对各指标进行统一量化,为了统一各指标的量纲,本文采用极差法对坡面植被—土壤系统中的各指标数据进行标准化处理。数据处理标准化方式如下:

正向指标: $X_{ij} = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j)$ (9)

反向指标: $X_{ij} = (\max x_j - x_{ij}) / (\max x_j - \min x_j)$ (10)

式中:*x_{ij}*,*X_{ij}*分别为指标原始数据、极差标准化后的指标数据;*min x_j*,*max x_j*分别为第*j*项指标的最小值和最大值。

1.3.2 权重确定 熵值法计算各指标权重:

$$W_j = d_j / \sum_{i=1}^n d_j \quad (11)$$

式中:*W_j*为评价指标的权重;*d_j*为指标效用值。*W_j*值越大,对评价的重要性就越大。

$$d_j = 1 - H_j \quad (12)$$

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n Y_{ij} \ln Y_{ij} \quad (13)$$

$$Y_{ij} = X_{ij} / \sum_{i=1}^n X_{ij} \quad (14)$$

式中:*H_j*为第*j*指标的信息熵;*k*=ln*m*,ln为自然对数;*m*为研究区样本数;*Y_{ij}*为第*j*项的第*i*个指标的比重,当*Y_{ij}*=0时,*Y_{ij}*ln*Y_{ij}*=0。

1.3.3 耦合度模型 植被—土壤系统的耦合度模型计算公式^[10-15]:

$$C_{SP} = \sqrt{\frac{S(x) \times P(y)}{[S(x) + P(y)]^2}} \quad (15)$$

式中:*C_{SP}*为植被—土壤系统的耦合度; $0 \leq C_{SP} \leq 1$ 。当*C_{SP}*接近于0时,说明植被—土壤系统要素之间不存在明显的关联,当*C_{SP}*接近于1时,说明植被—土壤系统要素之间存在明显耦合关联。*S(x)*为土壤系统;*P(y)*为植被系统,其公式分别为:

$$S(x) = \sum_{i=1}^m a_i x_i \quad (16)$$

$$P(y) = \sum_{j=1}^n b_j y_j \quad (17)$$

式中:*a_i*,*x_i*为坡面土壤系统中第*i*个土壤要素的权重值和标准化值;*b_j*,*y_j*为坡面植被系统中第*j*个土壤要素的权重值和标准化值。*S(x)/P(y)*为植被表示土壤耦合协调程度,其值越大,表明坡面土壤—植被系统发展越协调。

1.3.4 协调度模型 为了弥补耦合度模型不能反映植被—土壤系统在整个系统中的“功效”和“协同”效应的缺陷^[23],构建能反映植被—土壤系统相互作用的协调度模型^[10-15]:

$$D_c = \sqrt{C_{SP} \times T} \quad (18)$$

$$T = \alpha S(x) + \beta P(y) \quad (19)$$

式中:*D_c*为植被—土壤系统的协调度; $0 \leq D_c \leq 1$ 。当*D_c*接近于0时,植被—土壤系统的协调度越差,当*D_c*接近于1时,植被—土壤系统的协调度越好;*T*为植被—土壤系统的综合协调度系数; α, β 为土壤和植被系统的贡献率。在结合前人的研究成果和宁南山区的实际情况的基础上^[11,15],考虑到土壤和植被系统在生态环境建设过程中处于同等重要的地位,设 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

1.4 数据分析

所有数据使用 Excel 2010, SPSS 20.0 进行处理, YAAHP 11.2 进行层次分析法权重确定, ArcGIS 10.0 绘制相关图形,应用 CANOCO 4.5 进行植被—土壤各因子之间的 CCA 分析。

2 结果与分析

2.1 模型指标体系

根据指标选取的全面性、整体性、规范性、协调性及简明性等原则^[8,11],构建了宁南山区坡面不同土地类型下植被—土壤耦合协调性的两层指标体系,第一层包括土壤系统中的土壤物理化学属性指标,植被系统中的生态属性、化学属性和植物多样性指标。其中,考虑到宁南山区坡面土壤水分和干层分布是其主要限制因素,所以土壤物理属性由平均含水量、干层起始深度、干层厚度、干燥化指数、土壤水分相对亏缺指数、土壤容重、黏粒、饱和含水量、毛管孔隙度等指标构成,土壤化学属性由土壤有机质、全磷、全氮、全钾等指标构成;植被生态属性由株高、胸径、冠幅和生物量等指标构成,化学属性由植被有机质、全磷、全氮、全钾等指标构成,植物多样性由丰富度指数(R)、多样性指数(H)和优势度指数(C)构成。在处理研究区各指标权重时,为了避免单一赋权法产生的缺陷,降低赋权过程中的差异性,本研究将主观赋权法模糊层次分析法(AHP)和客观赋权法熵值法相结合,最后以二者权重的平均值作为综合权重。从表 2 可以看出,土壤系统中干层厚度、全钾、干燥化指数、水分相对亏缺指数和毛管孔隙度的综合权重较高,植被系统中丰富度指数、多样性指数、生物量等的综合权重较高。

2.2 植被—土壤系统协调发展类型判断标准

目前,国内外研究对于耦合协调度等级的划分缺乏统一的标准,在研究区调研、考察和大量查阅前人研究的成果基础之上^[10,14],确定本研究耦合协调度由 14 个土壤指标和 11 个植被指标构成,指标主要分为土壤物理、化学属性,植被生态、化学属性和多样性属性层(表 2)。由耦合协调度(D_c)值的大小将宁南山区坡面植被—土壤系统的耦合发展模式分为 10 大类(表 3),分别为极度失调发展模式、严重失调发展模式、中度失调发展模式、轻度失调发展模式、濒临失调发展模式、勉强协调发展模式、初级协调发展模式、中级协调发展模式、良好协调发展模式和优质协调发展模式。根据植被—土壤耦合协调程度 $S(x)/P(y)$ 值的大小关系划分出宁南山区坡面植被—土壤系统耦合协调类型及评判标准的 30 种耦合类型。

2.3 坡面植被—土壤系统耦合评价及其空间分布

由表 4 可知,土壤综合指数 $S(x)$ 由大到小依次为:农地>草地>弃耕地>灌木地>林地,而植被综合指数 $P(y)$ 由大到小依次为:农地>草地>林地>弃耕地>灌木地, $S(x)/P(y)$ 和 D_c 呈现农地>草地>弃耕地>灌木地>林地。宁南山区坡面不同土地类

型下的植被—土壤系统耦合协调关系存在一定差异,其中林地和灌木地均属于濒临失调发展模式土壤滞后发展型,说明土壤系统制约了植被的可持续发展。而弃耕地和草地均属于同一类耦合模式,即勉强协调发展模式植被—土壤同步发展型,研究区土壤系统基本可以满足草本植被的生长需求。农地属于初级协调发展模式植被—土壤同步发展型,农地作为耕作土壤,农民为了提高作物的产量进行有规律的灌溉、施肥和翻耕等,同时农地作物对深层土壤水分利用有限,降水补给使土壤干燥得到缓解^[24],因此农地土壤和植被系统处于稳定平衡的发展过程。

表 2 坡面植被—土壤耦合协调性评价指标权重

系统层	属性层	指标层			
		指标	AHP 法	改进熵值法	综合权重
植被系统	生态属性	株高	0.0622	0.0060	0.0341
		胸径	0.0904	0.0116	0.0510
		冠幅	0.0921	0.0178	0.0550
		生物量	0.1213	0.0617	0.0915
		有机质	0.0462	0.0726	0.0594
	化学属性	全磷	0.0231	0.1050	0.0641
		全氮	0.0542	0.1150	0.0846
		全钾	0.0563	0.1094	0.0829
		丰富度指数(R)	0.1786	0.2150	0.1968
	多样性	多样性指数(H)	0.1645	0.2320	0.1983
		优势度指数(C)	0.1111	0.0540	0.0826
		容重	0.0832	0.0128	0.0480
	土壤系统	黏粒	0.0432	0.0353	0.0393
		粉粒	0.0563	0.0270	0.0417
		饱和含水量	0.0569	0.0496	0.0533
		毛管孔隙度	0.0763	0.0708	0.0736
		平均含水量	0.0539	0.0545	0.0542
		干层起始深度	0.0159	0.0171	0.0165
		干层厚度 ^a	0.2014	0.1801	0.1908
		干燥化指数	0.1208	0.0419	0.0814
		水分相对亏缺数 ^a	0.0645	0.0589	0.0617
		有机质	0.0512	0.1055	0.0784
土壤系统	化学属性	全磷	0.0313	0.0340	0.0327
		全氮	0.0345	0.0963	0.0654
		全钾	0.1106	0.2159	0.1633

注:表中 a 表示该指标为反向指标。

为了更加直观地显示出宁南山区坡面植被—土壤耦合度空间分布情况,结合坡面土地利用方式(图 1),依据植被—土壤系统耦合协调状况评判结果,使用 ArcGIS 10.0 绘制出坡面不同土地类型下植被—土壤生态系统耦合协调状况分布图。从图 2 可知,研究区主要以濒临失调发展模式且土壤滞后发展型为主,其面积占区域总面积的 50% 以上,分布区域主要位于坡面东北和西南部,主要是乔木和灌木的分布区域;勉强协调发展模式且植被—土壤同步发展型的区域面积小于濒临失调发

展模式且土壤滞后发展型,呈现带状分布规律,分布在坡面中、西部地区,主要是草地和弃耕地的分布区域;初级协调发展模式且植被—土壤同步发展型的面

积最小,其主要是农田分布区域。

表 3 坡面植被—土壤干层系统耦合协调类型划分

耦合协调度	耦合模式	$S(x)/P(y)$	耦合协调特征
$0 < D_c \leq 0.1$	极度失调发展模式	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被—土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.1 < D_c \leq 0.2$	严重失调发展模式	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被—土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.2 < D_c \leq 0.3$	中度失调发展模式	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被—土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.3 < D_c \leq 0.4$	轻度失调发展模式	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被—土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.4 < D_c \leq 0.5$	濒临失调发展模式	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被—土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.5 < D_c \leq 0.6$	勉强协调发展模式	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被—土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.6 < D_c \leq 0.7$	初级协调发展模式	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被—土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.7 < D_c \leq 0.8$	中级协调发展模式	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被—土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.8 < D_c \leq 0.9$	良好协调发展模式	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被—土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.9 < D_c \leq 1.0$	优质协调发展模式	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被—土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展

表 4 坡面植被—土壤生态系统耦合协调状况评判结果

类型	D_c	$S(x)$	$P(y)$	$S(x)/P(y)$	T	土壤—植被系统耦合模式
林地	0.4460	0.2927	0.5963	0.4908	0.3722	濒临失调发展模式土壤滞后发展
灌木地	0.4515	0.3160	0.5325	0.5934	0.4243	濒临失调发展模式土壤滞后发展
弃耕地	0.5059	0.4639	0.5649	0.8212	0.2560	勉强协调发展模式植被—土壤同步发展
草地	0.5312	0.5280	0.6045	0.8734	0.5663	勉强协调发展模式植被—土壤同步发展
农地	0.6046	0.7966	0.6709	1.1874	0.7338	初级协调发展模式植被—土壤同步发展

2.4 坡面植被—土壤系统因子间典型相关分析

通过耦合协调度分析发现坡面植被—土壤系统间存在一定的相关性,为进一步揭示植被—土壤系统各因子间的相关性,把土壤平均含水量、干层起始深度、干层厚度、干燥化指数等 14 个土壤因子作为解释变量,把株高、胸径、冠幅和生物量等 11 个植被因子作为响应变量,应用 CANOCO 4.5 进行坡面植被—土壤各因子之间的 CCA 分析。由表 5 可知,在轴Ⅰ和轴Ⅱ水平上,土壤因子与植被因子的相关系数分别

为 0.389,0.210,特征值分别为 0.018,0.003,累计贡献率分别为 76.6%,91.1%。图 3 中土壤系统各因子距原点越远对植被系统影响越大可知,干燥化指数、水分亏缺指数、平均含水量、黏粒、容重等是影响植被系统的主要因子。

3 讨论

由坡面不同土地类型下植被—土壤系统耦合协调关系可知,林地、灌木属于濒临失调发展模式土壤

滞后发展型,坡面林地类型主要是杏树、刺槐、杨树和榆树等数种,一般而言,林地由于其生物量大、植被蒸腾能力强、根系较为发达^[25-26],所以对土壤水分的要求较高,同时宁南山区在生态环境恢复过程中植被种植密度、搭配方式等存在缺陷^[27],导致土壤水分大量消耗出现了土壤干燥化和干层现象^[28]。灌木群落虽然较乔木群落的需水量小,但是研究区坡面灌木主要以成群的形式出现,种植密度大、生物量大、水分消耗也较大,因此也呈现出濒临失调发展模式且土壤干层滞后发展型。弃耕地和草地群落中优势种均以草本植物为主,草本植物的根系、生物量远低于林地和灌木,对土壤水分的需求较少,植被蒸腾不强,其水分损失量均远低于乔木和灌木^[29],故弃耕地和草地呈现勉强协调发展且植被—土壤干层同步发展型^[30]。农地属初级协调发展模式且植被—土壤同步发展型,原因在于农地不仅位于水分条件相对较好的位置,而且灌溉、施肥和翻耕等人活动优化了农地土壤质量,导致土壤水分和养分等均处于优势地位^[31]。

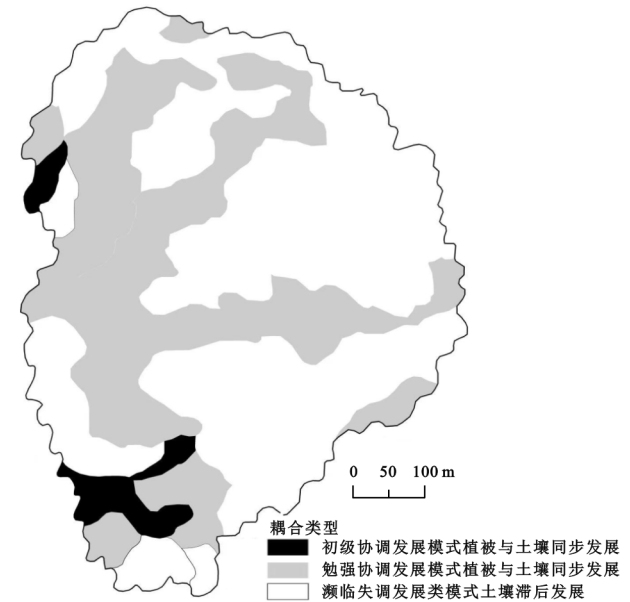


图 2 坡面植被—土壤生态系统耦合协调状况分布

表 5 坡面植被—土壤系统各因子间典型相关分析

轴序号	特征值	土壤因子与植被	土壤因子与植被因子的
		因子的相关系数	累计贡献率/%
I	0.018	0.389	76.6
II	0.003	0.210	91.1
III	0.001	0.358	96.1
IV	0.001	0.233	99.1

在宁南山区坡面植被—土壤系统中各因子相互作用的结果可知,土壤系统中的土壤干燥化指数、水分亏缺指数、平均含水量、黏粒和容重对植被系统中的丰富度指数、优势度指数、多样性指数、冠幅、株高、

胸径等影响较大。已有研究表明在西北半湿润半干旱区植被—土壤系统中,土壤水分是制约植物生长、植被演替和景观分异等的重要因素之一^[32-33],同时植被是土地干燥化、荒漠化和水土流失的主要调控者^[2,10]。在自然状态下土壤水分状况会间接影响植被演替和选择,但近几十年为了恢复黄土区的生态环境,进行了退耕还林(草)等一系列恢复区域植被的工程,给该区域带来了显著的生态环境效益和一部分经济效益。但是随着时间的推移,在黄土高原各个区域都出现了植被—土壤系统不稳定甚至退化的情况,如“小老头树”、土壤干燥化、干层等问题^[9,26]。总体上看,在黄土半湿润半干旱区土壤水分是植被恢复的重要制约因素之一,在生态恢复过程中人工林草植被搭配不合理、种植密度过大等,都会导致植被耗水增强、土壤水分过度消耗,进而引起植被退化、衰竭、土壤干燥化甚至出现土壤干层情况^[16,30]。因此,宁南山区在今后植被恢复时需充分考虑区域水土资源状况及承载能力,进行科学合理的林草植被选取、搭配,确保区域植被—土壤系统的协调和可持续发展。

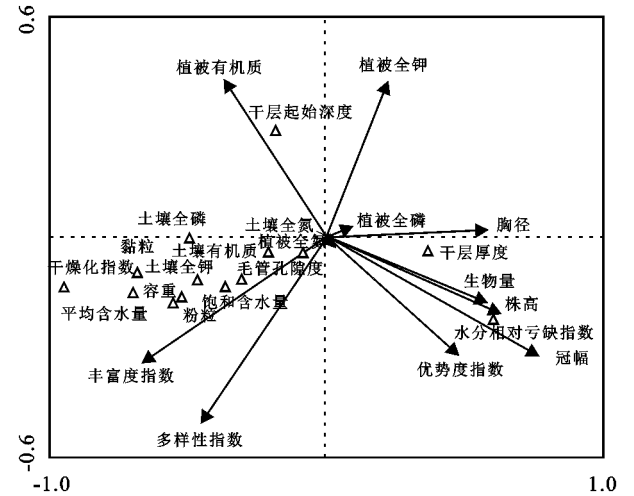


图 3 坡面植被—土壤各因子之间的 CCA 分析

4 结论

(1) 坡面林地、灌地、弃耕地、草地和农地 D_c 值分别为 0.446 0, 0.451 5, 0.505 9, 0.531 2, 0.604 6, $S(x)/P(y)$ 值分别为 0.490 8, 0.593 4, 0.821 2, 0.874 3, 1.187 4, 即林地和灌木地均属濒临失调发展模式且土壤滞后发展型, 弃耕地和草地均属勉强协调发展模式且植被与土壤同步发展型, 农地属于初级协调发展模式且植被与土壤同步发展型。

(2) 坡面空间上, 濒临失调发展类模式土壤滞后发展型分布区域主要在东北和西南部, 主要是乔木和灌木分布区域。勉强协调发展模式植被—土壤同步发展型在空间分布上呈现条状分布, 主要分布在中、

西部地区,主要是荒草地和草地分布区域。初级协调发展模式植被—土壤同步发展面积最小且分布零碎,主要是农田分布区。

(3) CCA 分析表明坡面土壤系统中干燥化指数、水分亏缺指数、平均含水量、黏粒、容重等是影响植被系统的主要因子。

参考文献:

- [1] 徐勤学,李春茂,陈洪松,等.喀斯特峰丛坡地灌木林地与梯田旱地土壤水分入渗特征[J].农业工程学部,2018,34(8):124-131.
- [2] 赵珩航,曹斌挺,焦菊英.黄土丘陵沟壑区退耕坡地不同植物群落的土壤侵蚀特征[J].中国水土保持科学,2017,15(3):105-113.
- [3] 马建业,李占斌,马波,等.黄土区小流域植被类型对沟坡地土壤水分循环的影响[J].生态学报,2020,40(8):2698-2706.
- [4] Sur C, Yong J, Choi M. Temporal stability and variability of field scale soil moisture on mountainous hillslopes in northeast Asia[J]. *Geoderma*, 2013, 207/208: 234-243.
- [5] 包维斌,王幼奇,刘鹏,等.宁南山区不同土地利用类型下土壤水分分布及其干燥化特征[J].草地学报,2020,28(3):775-783.
- [6] 谢贤健,张彬.基于耦合关联分析的护岸植被恢复土壤抗蚀性综合评价[J].土壤,2019,51(3):609-616.
- [7] Simon Z E, David D B, Michael H C, et al. Vegetation-soil moisture coupling metrics from dual-polarization microwave radiometry using regularization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231(5):1-11.
- [8] 于洋,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J].生态学报,2016,36(11):3441-3449.
- [9] Chen S B, Huang S, Liu Y L, et al. Soil and vegetation spectral coupling difference (SVSCD) for minerals extraction from hyperion data in vegetation covered area [J]. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(6):957-972.
- [10] 徐明,张健,刘国彬,等.不同植被恢复模式沟谷地植被—土壤系统耦合关系评价[J].自然资源学报,2016,31(12):2137-2146.
- [11] 彭晚霞,宋同清,曾馥平,等.喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程的植被土壤耦合协调度模型[J].农业工程学报,2011,27(9):305-310.
- [12] 于明含,孙保平,胡生君,等.退耕还林地结构与生态功能的耦合关系[J].生态学报,2014,34(17):4991-4998.
- [13] 张艳,赵廷宁,史常青,等.坡面植被恢复过程中植被与土壤特征评价[J].农业工程学报,2013,29(3):124-131.
- [14] 李豪,卢纪元,魏天兴,等.陕北黄土高原不同微地形下植被—土壤系统耦合特征研究[J].四川农业大学学报,2019,37(2):53-59,75.
- [15] 彭晚霞,宋同清,曾馥平,等.喀斯特常绿落叶阔叶混交林植物与土壤地形因子的耦合关系[J].生态学报,2010,30(13):3472-3481.
- [16] 刘丙霞,任健,邵明安,等.黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究[J].生态学报,2019,40(11):3795-3803.
- [17] 汪星,高志永,汪有科,等.修剪与覆盖对黄土丘陵区枣林土壤干层的修复效应[J].林业科学,2018,54(7):24-30.
- [18] 徐建霞,王建柱.三峡库区香溪河消落带植被群落特征与土壤环境相关性[J].生态学杂志,2018,37(12):3661-3669.
- [19] 罗云建,张小全,王效科,等.森林生物量的估算方法及其研究进展[J].林业科学,2009,45(8):129-134.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1983.
- [21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,1999.
- [22] 赵云鹏,白一茹,陆学娥,等.宁夏不同种植年限下晒砂瓜土壤干燥化效应研究[J].水土保持研究,2019,26(1):273-279.
- [23] 李小雁.干旱地区土壤—植被—水文耦合、响应与适应机制[J].中国科学:地球科学,2011,41(12):1721-1730.
- [24] 缪凌,董建国,汪有科,等.黄土丘陵区不同土地利用类型下的深层土壤水分变化特征[J].水土保持研究,2016,23(2):19-24.
- [25] 张敬晓,汪星,汪有科,等.黄土丘陵区林地干化土壤降雨入渗及水分迁移规律[J].水土保持学报,2017,31(3):231-238.
- [26] Zhao C L, Shao M A, Jia X X, et al. Spatial distribution of water-active soil layer along the south-north transect in the loess plateau of china [J]. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(2):228-240.
- [27] 刘茹,张庚,王思楚,等.宁南黄土丘陵沟壑区土地类型与土地利用耦合分析[J].北京师范大学学报:自然科学版,2018,54(3):426-434.
- [28] 李军,王学春,邵明安,等.黄土高原半干旱和半湿润地区刺槐林地生物量与土壤干燥化效应的模拟[J].植物生态学报,2010,34(3):330-339.
- [29] 梁海斌,薛亚永,安文明,等.黄土高原不同退耕还林植被土壤干燥化效应[J].水土保持研究,2018,25(4):77-85.
- [30] 王亚飞,樊军,贾沐霖.黄土高原水蚀风蚀交错区植被恢复中土壤水分变化[J].草地学报,2016,24(2):344-350.
- [31] 柴永福,岳明.植物群落构建机制研究进展[J].生态学报,2016,36(15):4557-4572.
- [32] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.
- [33] 王幼奇,张兴,陆学娥,等.宁夏压砂地不同植被类型土壤干燥化特征[J].西北植物学报,2018,38(11):147-155.