

DOI: 10.5846/stxb201709261739

赵威, 李亚鸽, 亓琳, 李琳, 王馨. 豫西丘陵坡地弃耕农田植被演替对土壤碳、氮库的影响. 生态学报, 2018, 38(19): - .

Zhao W, Li Y G, Qi L, Li L, Wang X. Effects of vegetation succession on soil carbon and nitrogen storage in abandoned hilly farmlands of the Western Henan Region. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): - .

豫西丘陵坡地弃耕农田植被演替对土壤碳、氮库的影响

赵 威^{1,*}, 李亚鸽¹, 亓 琳^{1,2}, 李 琳¹, 王 馨¹

¹ 河南科技大学农学院/牡丹学院, 洛阳 471023

² 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 在豫西丘陵坡地弃耕农田中, 设置一个时间梯度为 1, 3, 8, 15, 25 a 的弃耕演替系列, 调查其群落数量特征、物种组成、植被与土壤的碳、氮储量, 分析群落的自然次生演替过程, 并探讨土壤碳库与氮库对植物群落演替的响应机制。结果表明, 弃耕农田群落演替缓慢, 阶段性不明显, 大致可划分为一、二年生草本→多年生草本+灌木两个阶段。定植物种的多样性变化与附近的原生植被有关。在 25 a 的演替进程中, 草本植物始终占据优势, 旱生植物数量约是中生植物的 4 倍, C3 植物数量逐渐增多; 群落 α 多样性指数呈先增大后减小趋势, Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数与 Shannon-Wiener 综合多样性指数最大值分别为 1.53、0.95、2.18, 表明弃耕农田的自然演替促使群落结构更加复杂并趋向稳定。群落植物的碳、氮储量随着生物量的增加而增加, 在 25 a 时分别达到 313.14 g/m² 和 11.69 g/m²。土壤碳储量与氮储量的变化相反, 在演替后期 (25 a) 土壤碳储量增加到 960.98 g/m², 而氮储量则降低至 27.08 g/m², 表明豫西弃耕农田土壤具有“固碳放氮”的生态现象。RDA 分析表明, 群落盖度、密度和生物量是影响土壤碳、氮储量的主要因子。从群落的生态功能变化分析, 按照弃耕演替时间推进, 土壤碳储量逐渐增大, 有利于生态系统碳固定; 而土壤氮库的缩减则不利于群落的稳定, 建议增加群落中豆科植物的丰富度, 从而促进土壤氮素固定, 缓解氮素流失。

关键词: 弃耕农田; 次生演替; 生物多样性; 生物量; 碳、氮储量

Effects of vegetation succession on soil carbon and nitrogen storage in abandoned hilly farmlands of the Western Henan Region

ZHAO Wei^{1,*}, LI Yage¹, QI Lin^{1,2}, LI Lin¹, WANG Xin¹

¹ College of Agriculture/ College of Tree Peony, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China

² State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Understanding the vegetation, soil status, and their relationship on abandoned farmland plays an important role in the determination of future land use. In this study, five hilly farmlands abandoned for different periods of time (1, 3, 8, 15, and 25 years) were selected as a series of successive abandonments in the Western Henan region to investigate the quantitative characteristics and species composition of the plant community and the carbon and nitrogen storage in vegetation and the soil, to analyze the natural secondary succession process of the plant community, and to discuss how the soil carbon and nitrogen pool responded to the plant community succession. The main results indicated that: The abandoned farmland communities that possessed a slow succession progress and generally included two indistinct succession stages, from annual

基金项目: NSFC-河南人才培养联合基金 (U1304306); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05050402); 河南科技大学第六届研究生创新基金 (CXJJ-2016-ZR12)

收稿日期: 2017-09-26; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhwibcas@163.com

or biennial herbs to perennial herbs and shrubs. The plant species diversity was closely related to the surrounding native vegetation. Over 25 years, herbs in the community always had an advantage status, the number of xerophytes was more than four times that of mesophytes, and the quantity of C3 plants increased gradually. The α diversity index first increased and then decreased, and the maximum values of the Margalef, Pielou and Shannon-Wiener indices were 1.53, 0.95, and 2.18, respectively. These data could provide proof that the community structure became more complex and stable after a natural succession process of 25 years. Both plant carbon storage and nitrogen storage increased as the community biomass constantly accumulated, reaching values of 313.14 g/m^2 and 11.69 g/m^2 , respectively, at the 25-year succession stage. The soil carbon storage trend opposed that of soil nitrogen storage. In the climax stage (25a), the soil carbon storage increased to 960.98 g/m^2 , whereas the soil nitrogen storage was reduced to 27.08 g/m^2 . Therefore, the changes in the soil property of the abandoned farmlands in the Western Henan region resulted in the ecological phenomenon of “carbon fixation and nitrogen release”. Redundancy analysis (RDA) showed that the community coverage, density and biomass were the main factors affecting soil carbon and nitrogen storage. The analysis of the ecological function changes of these communities showed that soil carbon storage gradually increased as the time since abandonment increased, which was beneficial to the carbon fixation of the ecosystem. However, the reduction in soil nitrogen storage in abandoned farmlands did not contribute to the stability of the ecosystem. Thus, an increase in the richness of leguminous plants in the community was suggested to promote biological immobilization of soil total nitrogen and alleviate soil nitrogen loss.

Key Words: abandoned farmland; secondary succession; biodiversity; biomass; carbon, nitrogen storage

耕作环境较差、农民进城务工等因素促使河南丘陵坡地农田弃耕现象严重^[1],因而这类土地资源的动态变化与驱动因素问题备受关注^[2-3]。对弃耕农田进行土地管理,究竟是复垦,还是自然恢复?回答这个问题首先要明确其植被与土壤变化规律以及二者的响应关系。

无干扰条件下弃耕农田次生演替过程通常为分阶段循环往复式发展^[4],物种组成存在延续性与递进性^[5];演替进程可划分为一年生草本—一年生草本+多年生草本—草本+灌木—乔灌木 4 个阶段^[6-8];群落结构趋向复杂化,与临近原生植被的相似性逐渐增加^[9-11]。但弃耕农田的演替存在区域性差异。我国西北盐渍化弃耕地群落结构趋向于单一化^[12-13],而秦岭太白山地区群落复杂性则逐渐增加,分层现象明显^[14]。弃耕地土壤性质的变化与地上群落演替密不可分^[15-16],例如:紫色土弃耕坡地的植被物种多样性指数与表层土壤碳、氮含量呈正相关关系^[17];黄土丘陵区表层土壤有机质也随植被密度增加而逐渐积累^[18-23]。土壤理化性质对群落演替有直接影响^[24-26],有机碳、有效氮是制约弃耕地植被恢复的关键因素^[27]。土地利用方式的转变可打破土壤碳、氮的库源平衡^[28],黄土高原丘陵区 and 缙云山坡地弃耕农田表层土壤碳、氮储量均显著高于原有耕地^[29-30]。

目前有关弃耕农田研究多专注于群落演替影响因素^[1,31]、土壤理化性质变化^[32-35]、植被演替方向^[10,36]、复垦潜力评价^[37-38]等,而针对丘陵坡地弃耕农田演替过程中群落植物功能多样性以及植被与土壤碳、氮库变化相互关系的研究十分有限。本研究采用时空替代法^[25],以豫西地区丘陵坡地弃耕农田为研究对象,分析自然演替过程中群落植物功能多样性与物种多样性、群落生物量以及碳、氮储量变化规律,探讨土壤碳、氮库对植物群落变化的响应,为明确丘陵坡地弃耕农田演替方向和再利用途径提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

豫西通常是指三门峡市、洛阳市所在的河南省西部地区,总面积约 $2.6 \times 10^3 \text{ km}^2$,西依秦岭、南望伏牛、北靠太行,地形、地貌复杂多变,是黄土高原的边缘地带,生态环境比较脆弱。土壤类型以黄绵土、棕壤土、褐土为主。豫西属温带大陆性季风气候,四季分明;也是典型的半干旱、半湿润地区,年平均温度 $13.5\text{—}14.5^\circ\text{C}$,年

平均降水量 550—650 mm。该地区的农业活动主要通过 在丘陵山地开垦梯田,种植玉米 (*Zea mays*)、花生 (*Arachis hypogaea*)、小麦 (*Triticum aestivum*)、红薯 (*Ipomoea batatas*)、芝麻 (*Sesamum indicum*) 等农作物。由于受自然与水肥条件限制,农作物产量始终受到制约。

试验开展前期通过大量走访调查,选取了 5 个海拔高度 (400—500 m)、土壤类型 (黄绵土) 相对一致,且无人为干扰和放牧的典型弃耕农田,其弃耕年限分别是 1、3、8、15 a 和 25 a,构建为一个演替系列。所选样地中以多年生草本植物与灌木居多,自然植被是以酸枣+多年生草本群落为主的暖温性灌草丛。研究样地的植被状况如表 1 所示。

表 1 调查样地植物群落物种组成
Table 1 The species composition of plant community in investigated plots

弃耕年限 Abandoned years/a	优势种 Dominant species	重要值 Important value	建群种 Constructive species	重要值 Important value	伴生种 Companion species
1	毛马唐	0.77	毛马唐 苳草	0.77 0.15	委陵菜、益母草、夏至草、荆条、猪毛蒿、野艾蒿
3	白羊草 胡枝子	0.64 0.43	白羊草 细叶苔草	0.64 0.41	绣线菊、苳草、白酒草、博落回、野艾蒿、罗勒
8	紫花地丁 铁杆蒿	0.44 0.28	铁杆蒿 胡枝子	0.28 0.21	白羊草、猪毛蒿、野艾蒿、阴地蒿、黄背草、苔草、狗娃花、莎草
15	紫花地丁 黄背草	0.54 0.23	胡枝子 黄背草	0.25 0.23	荆条、酸枣、委陵菜、猪毛蒿、狗娃花、苳草、莎草
25	白羊草	1.21	白羊草 酸枣	1.21 0.24	长叶胡枝子、截叶铁扫帚、抱茎小苦荬、野艾蒿、猪毛蒿、紫花地丁、委陵菜、马唐

毛马唐 (*Digitaria chrysoblephara*), 苳草 (*Arthraxon hispidus*), 委陵菜 (*Potentilla chinensis*), 益母草 (*Leonurus japonicus*), 夏至草 (*Lagopsis supina*), 荆条 (*Vitex negundo*), 猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*), 野艾蒿 (*Artemisia lavandulifolia*), 白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*), 胡枝子 (*Lespedeza bicolor*), 细叶苔草 (*Carex tenuiflora*), 绣线菊 (*Spiraea salicifolia*), 白酒草 (*Eschenbachia japonica*), 博落回 (*Macleaya cordata*), 罗勒 (*Ocimum basilicum*), 紫花地丁 (*Viola philippica*), 铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*), 阴地蒿 (*Artemisia sylvatica*), 黄背草 (*Themeda japonica*), 苔草 (*Carex tristachya*), 狗娃花 (*Heteropappus hispidus*), 莎草 (*Cyperus rotundus*), 酸枣 (*Ziziphus jujuba*), 长叶胡枝子 (*Lespedeza caraganae*), 截叶铁扫帚 (*Lespedeza cuneata*), 抱茎小苦荬 (*Ixeridium sonchifolium*), 马唐 (*Digitaria sanguinalis*)

1.2 样地调查与取样

于 2016 年植物生长季 7—8 月进行样地调查。采用 5 点取样法,在每个样地设置 5 个 1 m×1 m 的样方,调查植物物种组成与群落的高度、盖度、密度等数量特征。之后使用剪刀齐地面剪下所有植物的地上活体部分,同时收集样方内的凋落物,按照样方编号分别装入牛皮纸信封袋,带回实验室在 65℃ 条件下 24 h 烘干至恒重,测定其干重,并留存备用做下一步的碳氮分析。

完成群落植物的调查和取样后,在每个样方中,使用直径 7.5 cm 根钻,按照 0—5、5—10、10—20、20—30、30—50 cm 的深度从上至下取样,每层 3 钻混合。按层分装在孔径为 0.3—0.4 mm 的纱袋中,并将写好取样信息的塑料标签置于纱袋内,带回室内漂洗,装进信封并做好标记,放进烘箱中 65℃ 烘干至恒重;按照上述分层深度使用直径 7.5 cm 土钻每层再取 3 钻土壤混合,装入自封袋中,带回室内自然阴干,然后使用 0.145 mm 筛网除去根系、动物残体等,留存备用做碳氮分析。

最后在 5 个样方中心位置挖一个体积为 1.0 m×0.5 m×0.5 m (长×宽×深) 的取样坑。在取样坑的边缘去除表面植物凋落物后,用环刀依次按照 0—5、5—10、10—20、20—30、30—50 cm 的深度从上至下取样,每层 3 个重复。环刀规格为高度 5 cm,体积一般为 100 cm³。按照不同土层做好标记带回室内 105℃ 烘干至恒重,称重。土壤容重 (g/cm³) = 土壤烘干重 (g) / 环刀体积 (cm³)。同时利用这些土壤样品进行土壤砾石比 (砾石重 / 土壤烘干重) 的测定。

1.3 样品分析与数据计算

(1) 群落物种多样性采用 α 多样性指数:

Margalef 丰富度指数: $Ma = (S-1)/\ln(N)$;

Pielou 均匀度指数: $JP = H'/\ln(S)$;

Shannon-Wiener 综合多样性指数: $H' = -\sum Pi \times \ln(Pi)$;

式中, S 为样方中的物种数目, N 为物种个体总数, Pi 采用相对密度、相对频度、相对盖度等表示^[10,39]。

(2) 植物与土壤碳、氮含量测定与计算:

使用杯式粉碎机和 MM400 型冷冻混合球磨仪(德国 Retsch)进行样品的粗粉和细粉,过 0.145 mm 筛网,然后采用干烧法使用 NA1500 型元素分析仪(意大利 Carlo Erba)测定植物与土壤样品的全碳、全氮含量^[40]。

植物碳、氮储量(g/m^2) = 植物碳、氮含量(%) $\times$ 生物量(g/m^2) $\times 10^2$ 。

(3) 根据土壤碳或氮含量、容重、砾石比和土层厚度计算土壤碳或氮储量:

土壤碳或氮储量(g/m^2) = $\sum C_i \times \theta_i \times D_i \times (1 - \delta_i) \times 10$

式中, C_i 、 θ_i 、 D_i 、 δ_i 分别为第 i 层土壤碳或氮含量(g/kg)、土壤容重(g/cm^3)、土层厚度(cm)、土壤砾石比^[41]。

1.4 统计分析

使用 SPSS 17.0 统计软件进行单因素方差分析(ANOVA),采用新复极差法(Duncan)进行平行数据间比较,采用字母标记法在 $P=0.05$ 水平下进行差异显著性检验。使用 Canoco 4.5 软件进行群落各因子的冗余分析(RDA)。采用 Excel 2016 与 Origin 9.0 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 不同年限弃耕农田植物群落的生物多样性特征

植物的功能多样性是生物多样性的的重要组成部分。如图 1 所示,在群落演替过程中,一、二年生草本植物与多年生草本植物在弃耕群落中所占比例较大,合计达到 60%—80%,前者先降低后升高,后者变化与前者相反。在弃耕初期,就有灌木幼苗存在,群落演替到 8 a 时,灌木所占比例降低为 10%。按照生态型将群落植物分为旱生植物与中生植物两种,前者比例维持在 80% 左右远大于后者。植物的光合途径类型可反映植物的初级生产能力。随着演替进行,弃耕农田植物群落 C3 植物的比例逐渐增加到 80%,而 C4 植物的比例则减小。弃耕农田植物群落中物种繁殖采取有性繁殖、无性繁殖、有性兼无性的方式,整体上所占比例为有性繁殖<无性繁殖<有性兼无性。

物种多样性是生物多样性的数量特征。在弃耕 3 a 时,群落植被高度显著大于其它年限的群落植被($P<0.05$),但其群落盖度最小,仅为 50.20%(表 2)。在弃耕 25 a 时,群落盖度显著大于演替前期($P<0.05$),达到最大值(84.60%)。在弃耕初期(1、3 a),群落植被密度较小,随后逐渐增大;弃耕 8 a 时,植被密度达到 163.67 株/ m^2 。随着演替进行,群落 Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数与 Shannon-Wiener 综合多样性指数具有相对一致的变化规律,即先增大后减小,但三者达到峰值的时间不同,分别是第 15 年、第 8 年。

表 2 不同年限弃耕农田植物群落的数量特征与物种多样性指数

Table 2 The community quantitative characteristics and species diversity index of farmland in different abandoned years

弃耕年限 Abandoned years/a	群落高度 Community height/cm	群落盖度 Community coverage/%	群落密度 Community density/ (株/ m^2)	丰富度指数 Margalef index	均匀度指数 Pielou index	综合多样性指数 Shannon-Wiener index
1	39.97 $\pm$ 6.58b	62.00 $\pm$ 5.83b	38.67	0.84	0.84	1.36
3	71.10 $\pm$ 11.77a	50.20 $\pm$ 4.18b	14.33	1.06	0.94	1.52
8	37.53 $\pm$ 5.37b	56.00 $\pm$ 9.67b	163.67	1.45	0.95	2.18
15	23.35 $\pm$ 1.71b	65.80 $\pm$ 8.96ab	120.67	1.53	0.92	2.11
25	32.66 $\pm$ 3.57b	84.60 $\pm$ 3.26a	138.00	0.66	0.75	1.20

同列不同小写字母表示不同年限间差异显著($P<0.05$)

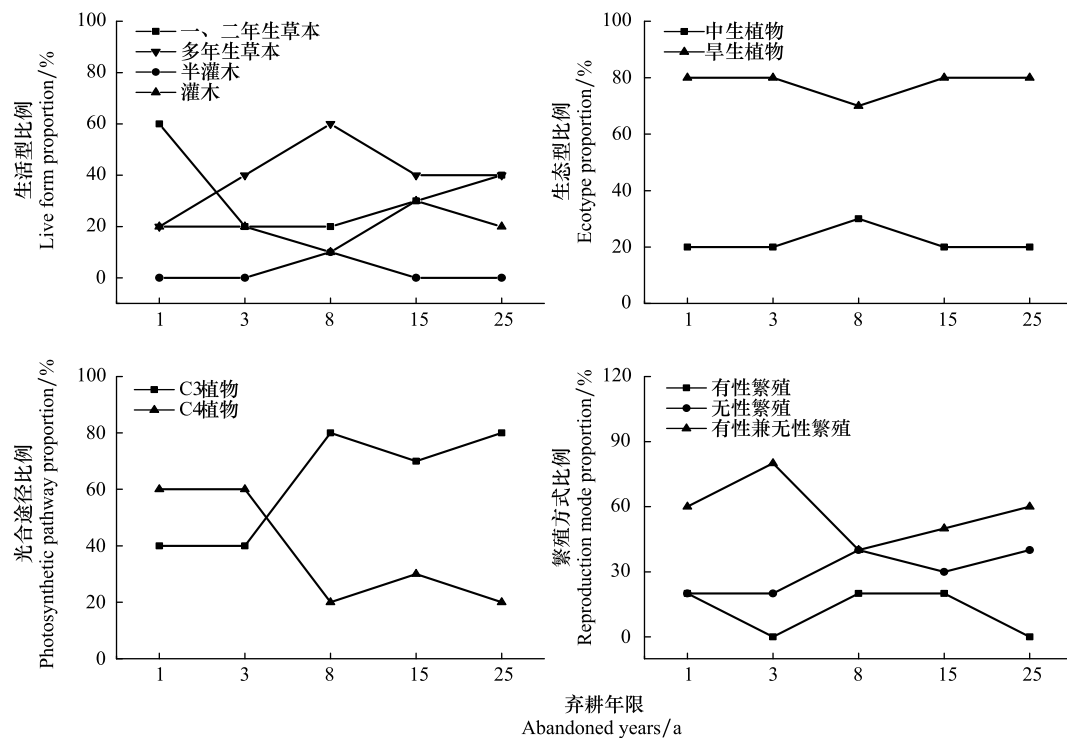


图1 不同年限弃耕农田群落植物的功能多样性

Fig.1 The plant functional diversity of farmland community in different abandoned years

2.2 不同年限弃耕农田群落植被的生物量与碳、氮储量

将群落植被生物量分成3个部分:地上活体生物量、凋落物生物量与根系生物量。随着演替进行,不同年限弃耕农田植物群落地上活体生物量之间不具有显著差异($P>0.05$),凋落物生物量在弃耕15 a时具有最大值(149.75 g/m^2 , $P<0.05$) (图2)。而根系生物量显著大于地上活体生物量和凋落物生物量,呈现不断增大趋势,其变化规律符合线性方程 $y=406.28x-37.38$ ($R^2=0.991$, y 、 x 分别表示根系生物量、弃耕年限)。在演替后期(15、25 a),根系生物量达到最大值($P<0.05$),且植物总生物量与根系生物量的变化规律一致。受植物生物量影响,植物地上活体、凋落物、根系及植物总碳储量的变化规律与对应的生物量变化同步(图2)。但是,植物总碳储量在演替的15 a与25 a之间无显著差异($P>0.05$)。

弃耕农田群落植被总氮储量随着演替时间不断增加(图3),在演替顶级阶段(25 a)达到最大值 11.80 g/m^2 ,显著大于其它的演替阶段($P<0.01$)。随着演替进行,地上活体氮储量没有显著性变化($P>0.05$)。弃耕15 a时凋落物氮储量达到最大值(0.178 g/m^2),且与其它演替阶段差异显著($P<0.05$)。群落演替至25 a时,根系氮储量为 11.35 g/m^2 ,显著大于其它的演替阶段($P<0.05$)。

2.3 不同年限弃耕农田土壤碳储量与氮储量变化

随着群落演替的进行,土壤碳储量与氮储量的变化趋势相反,碳储量逐渐增大;而氮储量整体上逐渐减小,其中在弃耕15 a时存在一个不显著的增加变化(图4)。演替顶级阶段(25 a)的土壤碳储量显著大于其它演替阶段的碳储量($P<0.05$),数值可达3.6—6.4倍。在演替的前期与中期(1—15 a),土壤碳储量比较稳定,且增量较小,变化不显著($P>0.05$)。对于土壤氮储量来说,弃耕25 a时的土壤氮储量显著低于弃耕1 y时的氮储量($P<0.05$),降低幅度约为1倍。

2.4 不同年限弃耕农田植物群落特征对土壤碳库与氮库的影响

土壤碳储量、氮储量与植物群落各指标间的RDA分析如图5所示。群落盖度、密度等生态因子对土壤碳储量具有正效应,影响程度由大到小依次为:群落盖度、群落密度、根系氮储量、植物氮储量、地上活体碳储量、植物总生物量、植物总碳储量、根系碳储量;而与均匀度指数、群落高度、地上活体生物量、地上活体氮储量存

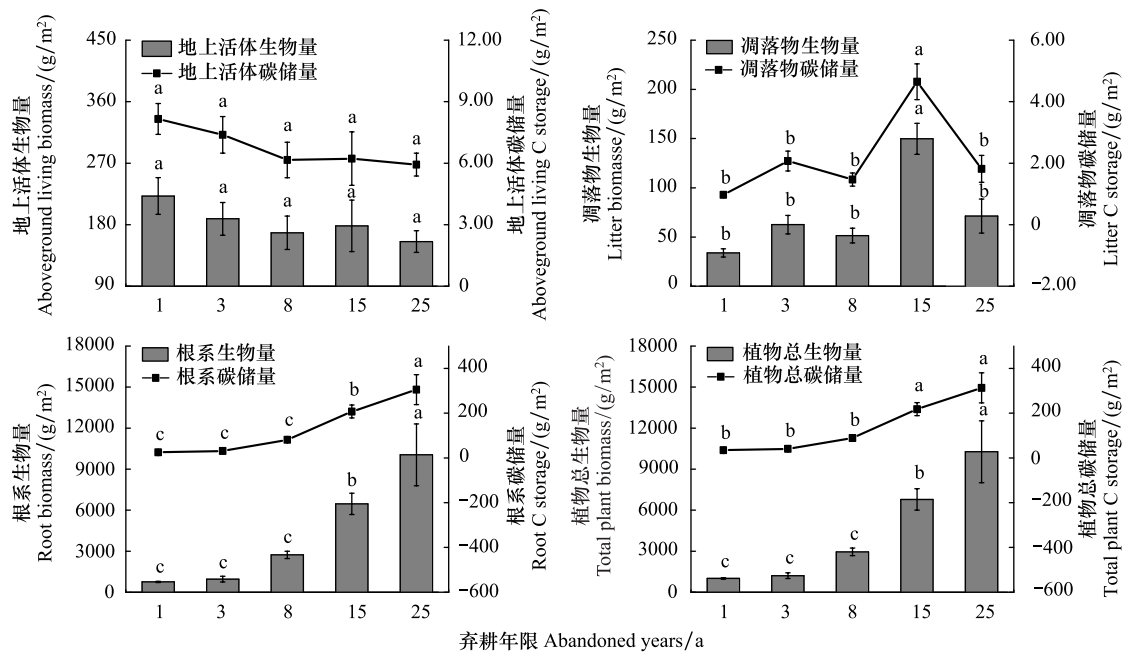


图2 不同年限弃耕农田群落植被生物量构成及其碳储量

Fig.2 The plant biomass composition and C storage of farmland community in different abandoned years

不同小写字母表示不同年限间差异显著 ($P < 0.05$)

在较大的负相关。对土壤氮储量而言,其对均匀度指数、群落高度、地上活体生物量、地上活体氮储量之间表现为正响应,且影响程度依次递减,而与群落密度、盖度之间存在显著的负效应关系。其它生态因子如丰富度指数、综合多样性指数、凋落物碳氮储量等对土壤碳储量与氮储量的影响很小。土壤碳储量与氮储量之间具有显著的负效应,这与图4中所呈现的变化结果相一致。

3 讨论

豫西丘陵坡地弃耕农田群落演替的阶段性和不明显,主要经历了一、二年生草本与多年生草本+灌木两个阶段,黄土高原丘陵坡耕地植被演替也遵循上述规律^[42]。演替初期就有灌木幼苗存在,这可能与周围环境原生植被中灌木的种子扩散有关^[43]。豫西丘陵原生植被以暖温性灌草丛为主,荆条和酸枣等灌木类物种较为常见。但退耕40多年的黄土高原植被恢复区并没有演替为灌丛或小乔木组成的群落^[44],其原因主要是草本植物在群落中占绝对优势,在没有外界干扰条件下其凋落物不断堆积,从而抑制了木本植物种子萌发和幼苗定植^[45]。从群落植物功能多样性角度分析,豫西丘陵坡地弃耕农田群落中多年生草本、有性兼无性繁殖物种比例较大,多年生草本植物庞大的根系及其繁殖方式有利于群落结构的稳定。如图1所示,随着演替的发展,群落中C4植物数量减少而C3植物增加,这是由于在演替早期植物群落盖度小,光照充足,资源竞争压力小,有助于C4植物占据群落空隙;相对于C4植物来说,C3植物的适应能力和竞争力更强,所以在演替后期比例增加。弃耕地群落植物整体耐旱性较强,与该地区处于半干旱、半湿润地带有关。随着群落演替进行,群落高度

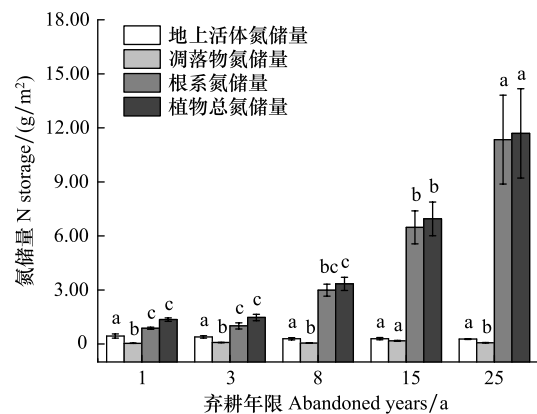


图3 不同年限弃耕农田群落植被氮储量

Fig.3 The N storage of farmland community in different abandoned years

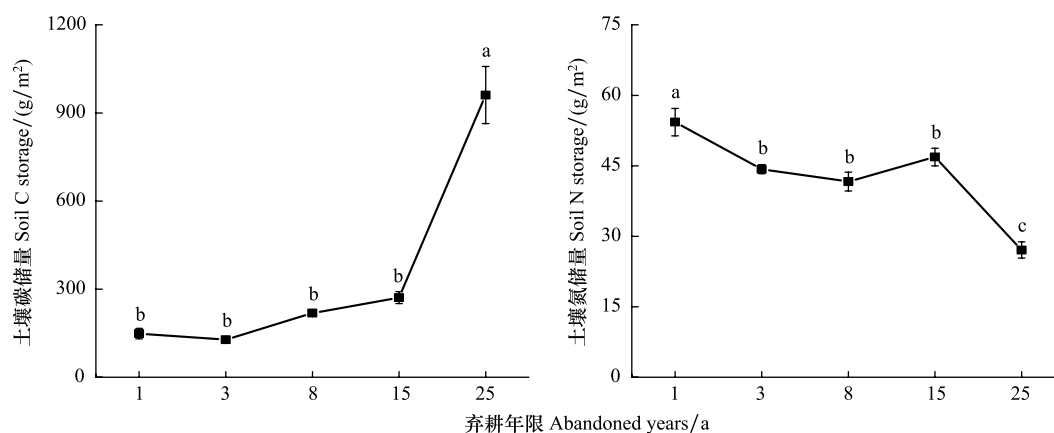


图 4 不同年限弃耕农田土壤碳储量与氮储量变化

Fig.4 The changes of soil C and N storage of farmland in different abandoned years

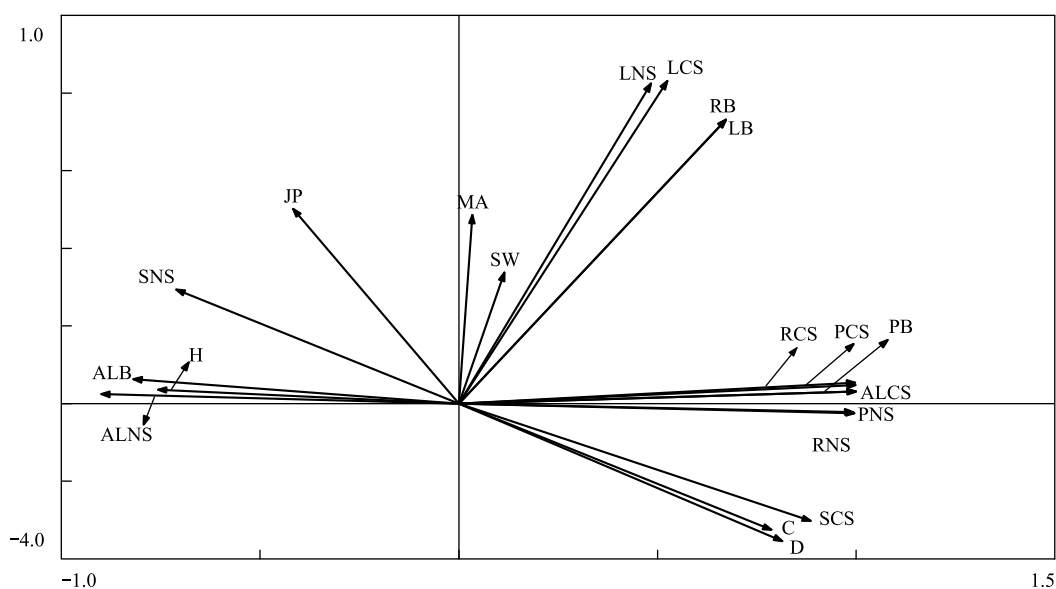


图 5 不同年限弃耕农田土壤碳氮储量与群落特征、植物碳氮储量关系的 RDA 分析

Fig.5 The RDA analysis of the relationship between C, N storage of soil and community characteristics, plant C, N storage of farmland in different abandoned years

H: 群落高度 Community height; C: 群落盖度 Community coverage; D: 密度 Density; MA: 丰富度指数 Margalef index; JP: 均匀度指数 Pielou index; SW: 综合多样性指数 Shannon-Wiener index; ALB: 地上活体生物量 Aboveground living biomass; LB: 凋落物生物量 Litter biomass; RB: 根系生物量 Root biomass; PB: 植物生物量 Plant biomass; ALCS: 地上活体碳储量 Aboveground living carbon storage; LCS: 凋落物碳储量 Litter carbon storage; RCS: 根系碳储量 Root carbon storage; PCS: 植物碳储量 Plant carbon storage; ALNS: 地上活体氮储量 Aboveground living nitrogen storage; LNS: 凋落物氮储量 Litter nitrogen storage; RNS: 根系氮储量 Root nitrogen storage; PNS: 植物氮储量 Plant nitrogen storage; SCS: 土壤碳储量 Soil carbon storage; SNS: 土壤氮储量 Soil nitrogen storage

降低、群落盖度和密度增加,物种多样性指数先增大后减小,这与薛超玉等^[19]的研究一致,表明撂荒演替过程中上述的群落变化使群落结构不断趋于稳定。

群落植被的碳、氮储量在很大程度上依赖于群落生物量,整体上均表现出逐渐增加的趋势。随着弃耕时间的延长,植被总生物量呈递增变化,这种差异主要是由根系生物量积累引起的^[46]。地上活体生物量具有一定的减小趋势,一方面是植物活体凋落回归土壤,另一方面可能是多年生草本积累的光合产物更多地转移至根系。杜峰等^[26]认为撂荒地群落地上生物量先减小后增加,主要受弃耕年限和土壤养分影响。在弃耕 25 a

时,凋落物生物量减小为 71.27 g/m^2 ,而且地上活体生物量也小于前一阶段,原因可能是群落内部环境改变使分解作用加强所导致。

按照演替系列发展,土壤生态系统表现出“固碳放氮”现象,即发挥着“碳汇氮源”的生态功能。如图 5 所示,群落盖度、密度、植被生物量、植被碳氮储量等与土壤碳储量具有显著的正相关关系,但它们与土壤氮储量存在负相关关系。由图 2 和图 3 可知,群落的生物量决定着植物体碳储量、氮储量的变化。通过对样品生物量、氮储量的分析发现,土壤的平均氮含量有微小幅度的下降变化,这个变化通过土壤氮储量公式被放大了约 10^2 倍。此外,凋落物生物量在弃耕 15 a 时较其它年份多,在该年份土壤的氮输入增多。正如图 4 所示,土壤氮储量在 15 a 时有不显著的增加变化。总的来说,土壤氮储量的变化一方面来自于土壤氮含量的下降,另一方面取决于凋落物的输入量,而凋落物的多少受植被群落密度、盖度、生物量等的影响。RDA 分析也说明,弃耕农田群落植被盖度、密度及生物量是影响土壤碳氮储量的主要因子,而且土壤氮含量也是影响因子之一。土地利用方式的改变导致植被变化,植物通过光合作用固定大气中的碳,并从土壤中吸收氮素供给自身生长,促进群落盖度、密度增大和生物量的积累,形成更多的凋落物。而在群落演替后期,土壤微生物活动加快,凋落物加速分解,一部分氮素以气体形式释放到空气中,而其余氮素回归土壤^[29,47]。Novara 等^[8] 也认为农业活动停止后土壤发挥“碳汇”作用,且呈线性递增。缙云山坡耕地有机碳含量为 2.58 g/kg ,而在弃耕后其含量增加到 14.90 g/kg ,这充分说明农田弃耕演替过程使土壤“碳汇”的作用不断恢复和增强^[30]。研究发现土壤有机质、全氮等随着弃耕年限的延长而积累^[7,11],而且土壤碳与全氮之间具有显著的正相关关系^[28]。这与本研究的结果不一致,可能与耕地撂荒之前的耕作方式有关,也可能是土壤中的氮通过一系列的化学与物理过程进入植物与大气中。另外一个不可忽略的因素是弃耕年限。李永强等^[32] 研究表明,土壤有机质与全氮呈现出先降低后增加的变化规律,其中大约在弃耕 33 a 后才表现出增加趋势。因此,在农田弃耕后土壤碳与氮的变化不同步,究竟是“汇”还是“源”,受何种因素影响,还有待于进一步深入研究。从生态系统物质循环角度分析,弃耕农田演替过程土壤对碳的固定不断增强,有助于缓解半干旱、半湿润地区丘陵坡地农田生态系统碳排放。在未来该地区的土地管理中,首先需要考虑选择的物种类型,建议适当增加群落中豆科植物的丰富度以增加土壤的氮储量,减少氮素流失。

4 结论

(1) 豫西丘陵坡地弃耕农田群落演替缓慢,且阶段性不明显,大致可划分为一、二年生草本与多年生草本+灌木两个阶段,而没有遵从一年生草本—一年生草本+多年生草本—草本+灌木—乔灌木这样一个常规演替系列模式。

(2) 在群落演替进程中,草本植物始终占据优势,合计达到 60%—80%,且多属旱生植物;C3 植物的比例逐渐增加,繁殖方式以有性兼无性繁殖为主。群落盖度在演替顶级时(25 a)达到最大值(84.60%),而群落高度与密度分别在弃耕 3 a 和 8 a 时出现最大值(71.10 cm , 163.67 株/m^2)。群落丰富度指数、均匀度指数与综合多样性指数先增大后减小,峰值分别为 1.53、0.95、2.18,但它们达到峰值的时间不同。

(3) 随着演替进行,不同年限弃耕农田植物群落地上活体生物量之间不具有显著差异,凋落物生物量在弃耕 15 a 时达到最大值(149.75 g/kg),而根系生物量呈现不断增大趋势,且显著大于地上活体生物量和凋落物生物量。植物地上活体、凋落物、根系及植物总碳储量的变化规律与对应的生物量变化同步,总氮储量在演替顶级阶段达到最大值(11.80 g/kg),且显著大于其它的演替阶段。

(4) 土壤碳储量与氮储量的变化趋势相反,碳储量逐渐增大而氮储量不断减小,但是在弃耕 15 a 时氮储量具有不显著的增加变化。演替顶级阶段(25 a)的土壤碳储量为 960.98 g/kg 显著大于其它演替阶段,而土壤氮储量(54.31 g/kg)则显著低于演替初期的氮储量(27.08 g/kg),减小了近 1 倍。

(5) 土壤氮储量与碳储量表现出显著的负相关关系,分别受不同的生态因子影响。群落盖度、密度、根系氮储量、植物氮储量、地上活体碳储量、植物总生物量、植物总碳储量、根系碳储量等因子对土壤碳储量具有正

效应;土壤氮储量与均匀度指数、群落高度、地上活体生物量、地上活体氮储量之间存在正响应关系,但是群落密度和盖度对土壤氮储量表现为显著的负作用。

参考文献 (References):

- [1] 谭术魁. 中国耕地撂荒问题研究. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 吴克宁, 郑义, 康鸳鸯, 申眺, 程道全, 李玲, 葛树春, 李继明, 穆兰, 赵华甫, 吕巧灵. 河南省耕地地力调查与评价. 河南农业科学, 2004, 33(9): 49-52.
- [3] 邢晓娜, 吴克宁, 吕巧灵, 张晋科. 河南省耕地动态变化及驱动力研究. 河南农业科学, 2005, 34(12): 56-61.
- [4] 杜峰, 徐学选, 张兴昌, 邵明安, 梁宗锁, 山仑. 陕北黄土丘陵区撂荒群落排序及演替. 生态学报, 2008, 28(11): 5418-5427.
- [5] Liu X Z, Zhang F, Shao H B, Zhang J T. Community succession analysis and environmental biological processes of naturally colonized vegetation on abandoned hilly lands and implications for vegetation restoration strategy in Shanxi, China. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(7): 1133-1145.
- [6] Sojneková M, Chytrý M. From arable land to species-rich semi-natural grasslands: Succession in abandoned fields in a dry region of central Europe. Ecological Engineering, 2015, 77: 373-381.
- [7] Du F, Shao H B, Shan L, Liang Z S, Shao M A. Secondary succession and its effects on soil moisture and nutrition in abandoned old-fields of hilly region of Loess Plateau, China. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2007, 58(2): 278-285.
- [8] Novara A, Gristina L, La Mantia T, Rühl J. Soil carbon dynamics during secondary succession in a semi-arid Mediterranean environment. Biogeosciences Discuss, 2011, 8(6): 11107-11138.
- [9] 薛莲, 李占斌, 戴全厚, 李鹏, 刘国彬, 翟胜. 侵蚀环境撂荒地植物群落恢复动态研究. 中国水土保持科学, 2009, 7(6): 14-19.
- [10] 李永强, 焦树英, 赵萌莉, 韩国栋. 草甸草原撂荒地演替过程中植被多样性指数变化. 中国草地学报, 2016, 38(3): 116-120.
- [11] Zhao W Z, Xiao H L, Liu Z M, Li J. Soil degradation and restoration as affected by land use change in the semiarid Bashang area, northern China. Catena, 2005, 59(2): 173-186.
- [12] 李治元, 李昌龙, 王多泽, 郭树江. 石羊河下游盐渍化弃耕地植被演替特征分析. 西北植物学报, 2010, 30(10): 2087-2092.
- [13] 严子柱, 尉秋实, 李得禄, 郭树江, 王多泽, 汪媛艳. 民勤青土湖盐碱化退耕地天然植被的演替特征. 中国农学通报, 2014, 30(16): 1-6.
- [14] 高贤明, 黄建辉, 万师强, 陈灵芝. 秦岭太白山弃耕地植物群落演替的生态学研究: II 演替系列的群落 α 多样性特征. 生态学报, 1997, 17(6): 619-625.
- [15] 刘作云, 杨宁. 紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤生态化学计量特征. 中国农学通报, 2015, 31(18): 163-167.
- [16] 温仲明, 焦峰, 赫晓慧, 焦菊英. 黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响. 草业学报, 2007, 16(1): 16-23.
- [17] 陈孙华. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段植物群落特征及其与土壤理化性质的耦合关系. 水土保持研究, 2014, 21(5): 7-12.
- [18] 严方晨, 焦菊英, 曹斌挺, 于卫洁, 魏艳红, 寇萌, 胡澎. 黄土丘陵沟壑区撂荒地不同演替阶段植物群落的土壤抗蚀性—以坊塌流域为例. 应用生态学报, 2016, 27(1): 64-72.
- [19] 薛超玉, 焦峰, 张海东, 汝海丽. 黄土丘陵区弃耕地恢复过程中土壤与植物恢复特征. 草业科学, 2016, 33(3): 368-376.
- [20] Jiang J P, Xiong Y C, Jiang H M, Ye D Y, Song Y J, Li F M. Soil microbial activity during secondary vegetation succession in semiarid abandoned lands of loess plateau. Pedosphere, 2009, 19(6): 735-747.
- [21] 刘海威, 张少康, 焦峰. 黄土丘陵区不同退耕年限草地群落特征及其土壤水分养分效应. 草业学报, 2016, 25(10): 31-39.
- [22] Yang C H, An H P. An evaluation of the initial stages of natural succession on abandoned land in mountain areas// Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions (Proceedings of the Chengdu Symposium), Chengdu: IAHS Publ, 1992: 465-469.
- [23] Jiao J Y, Tzanopoulos J, Xofis P, Bai W J, Ma X H, Mitchley J. Can the study of natural vegetation succession assist in the control of soil erosion on abandoned croplands on the loess plateau, China? Restoration Ecology, 2007, 15(3): 391-399.
- [24] 焦菊英, 马祥华, 白文娟, 焦峰, 温仲明. 黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落与土壤环境因子的对应分析. 土壤学报, 2005, 42(5): 744-752.
- [25] 安慧, 杨新国, 刘秉儒, 李学斌, 何秀珍, 宋乃平. 荒漠草原区弃耕地植被演替过程中植物群落生物量及土壤养分变化. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3145-3149.
- [26] 杜峰, 梁宗锁, 徐学选, 山仑, 张兴昌. 陕北黄土丘陵区撂荒地群落生物量及植被土壤养分效应. 生态学报, 2007, 27(5): 1673-1683.
- [27] 马祥华, 焦菊英, 白文娟, 焦峰, 温仲明. 黄土丘陵沟壑区退耕地土壤养分因子对植被恢复的贡献. 西北植物学报, 2005, 25(2): 328-335.
- [28] Deng L, Shangguan Z P, Sweeney S. Changes in soil carbon and nitrogen following land abandonment of farmland on the Loess Plateau, China. Plos One, 2013, 8(8): e71923.

- [29] 董云中, 王永亮, 张建杰, 张强, 杨治平. 晋西北黄土高原丘陵区不同土地利用方式下土壤碳氮储量. 应用生态学报, 2014, 25(4): 955-960.
- [30] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式土壤有机碳组分特征. 生态学报, 2015, 35(11): 3733-3742.
- [31] 雷锟, 阎建忠, 何威风. 基于农户尺度的山区耕地撂荒影响因素分析. 西南大学学报:自然科学版, 2016, 38(7): 149-157.
- [32] 李永强, 赵萌莉, 韩国栋, 焦树英. 不同年限草原撂荒地土壤理化特性研究. 中国草地学报, 2012, 34(3): 61-64, 69-69.
- [33] 杜峰, 梁宗锁, 徐学选, 张兴昌, 山仑. 陕北黄土丘陵区撂荒群落土壤养分与地上生物量空间异质性. 生态学报, 2008, 28(1): 13-22.
- [34] 宁婷, 郭忠升. 半干旱黄土丘陵区撂荒地土壤水分循环特征. 生态学报, 2015, 35(15): 5168-5174.
- [35] 陈懂懂, 李奇, 邹小艳, 赵新全, 徐世晓, 蔡海, 邹婧汝, 赵亮. 青海湖农场退耕还林草后的土壤碳氮变化. 草地学报, 2014, 22(3): 469-474.
- [36] 夏会娟, 张远, 张文丽, 孔维静, 姚懿函. 辽河保护区河岸农田撂荒恢复初期植物物种特征. 生态学杂志, 2014, 33(1): 41-47.
- [37] 国土资源部土地整治重点实验室. 土地复垦潜力调查评价研究. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013.
- [38] Yang H C, Zhang F H, Chen Y, Xu T B, Cheng Z B, Liang J. Assessment of reclamation treatments of abandoned farmland in an arid region of China. Sustainability, 2016, 8(11): 1183-1183.
- [39] 张睿洋, 王忠武, 韩国栋, 潘占磊, 刘芳, 武倩, 阿木尔萨那. 短花针茅荒漠草原 α 多样性对绵羊载畜率的响应. 生态学报, 2017, 37(3): 906-914.
- [40] Robertson G P, Coleman D C, Bledsoe C S, Sollins P. Standard soil methods for long-term ecological research. New York: Oxford University Press, 1999: 92-94.
- [41] 刘顺, 罗达, 刘千里, 张利, 杨洪国, 史作民. 川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局. 生态学报, 2017, 37(4): 1074-1083.
- [42] Kou M, Jiao J Y, Yin Q L, Wang N, Wang Z J, Li Y J, Yu W J, Wei Y H, Yan F C, Cao B T. Successional trajectory over 10 years of vegetation restoration of abandoned slope croplands in the hill-gully region of the loess plateau. Land Degradation & Development, 2016, 27(4): 919-932.
- [43] Buisson E, Dutoit T. Colonisation by native species of abandoned farmland adjacent to a remnant patch of Mediterranean steppe. Plant Ecology, 2004, 174(2): 371-384.
- [44] 温仲明, 焦峰, 刘宝元, 卜耀军, 焦菊英. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2025-2029.
- [45] Ruskule A, Nikodemus O, Kasparinskis R, Prižavoi D, Bojāre D, Brūmelis G. Soil-vegetation interactions in abandoned farmland within the temperate region of Europe. New Forests, 2016, 47(4): 587-605.
- [46] 于永强, 宇万太, 张璐. 海伦撂荒地植物生物量的季节变化. 应用生态学报, 2002, 13(6): 685-688.
- [47] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 潘庆民. 土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1385-1390.