

# 黄土丘陵区退耕草地群落盖度与地上生物量关系

贾 昭<sup>1</sup>, 简春霞<sup>1</sup>, 熊沛枫<sup>1</sup>, 陈志飞<sup>1</sup>, 周俊杰<sup>1</sup>, 杨 全<sup>2</sup>, 徐炳成<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,  
陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**揭示黄土丘陵区退耕草地群落盖度与地上生物量的关系,对系统评价草地群落恢复潜力和水土保持效益具有重要意义。以黄土丘陵区 5 个退耕年限(5 a, 10 a, 15 a, 20 a, 30 a)草地群落为对象,通过照相法、群落调查和刈割法测定了草地群落盖度、物种组成和地上生物量。结果表明:群落高度、盖度与地上生物量呈显著正相关关系,与物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数呈显著负相关关系。群落盖度与地上生物量随退耕年限增加总体呈增加趋势,不同退耕年限草地群落间物种丰富度和多样性指数无显著差异。退耕 20 a 群落的植物密度、高度和单位盖度地上生物量值均最低,盖度和地上生物量与退耕 15 a 相比显著下降。各退耕年限草地群落优势种分别为:5 a 是狗尾草(*Setaria viridis*)和达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*), 10 a 和 15 a 是达乌里胡枝子和铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*), 20 a 是铁杆蒿和菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*), 30 a 为长芒草(*Stipa bungeana*)。当草地群落盖度低于 84.6% 时,盖度与地上生物量呈极显著线性正相关关系,当盖度大于 84.6% 后,群落盖度不随地上生物量增加而变化。群落盖度 84.6% 和地上生物量 285.17 g/m<sup>2</sup> 可作为黄土丘陵区退耕草地植被恢复评价和调控措施的参考值。

**关键词:**退耕草地; 群落盖度; 物种组成; 地上生物量

**中图分类号:** Q149

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2020)01-0319-09

## Relationship Between Community Coverage and Aboveground Biomass in Farming-Withdrawn Grasslands in Loess Hilly-Gully Region

JIA Zhao<sup>1</sup>, JIAN Chunxia<sup>1</sup>, XIONG Peifeng<sup>1</sup>, CHEN Zhifei<sup>1</sup>,

ZHOU Junjie<sup>1</sup>, YANG Quan<sup>2</sup>, XU Bingcheng<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** It is of great significance to systematically evaluate the restoration potential of grassland by revealing the relationship between coverage and aboveground biomass of different farming-withdrawn grasslands in loess hilly-gully region. We selected five grassland communities with different withdrawn years (5-year, 10-year, 15-year, 20-year, 30-year) and three methods including photographic method, community survey and harvest methods were employed to obtain their coverage, species composition and biomass. The result showed that community average height had significantly positive correlation with coverage and aboveground biomass, while there is a significant negative correlation between species richness and Shannon-Wiener diversity index; Vegetation coverage and aboveground biomass increased with abandoned years, while species richness and Shannon diversity index showed no significant differences among communities; the plant density, community height and aboveground biomass per unit coverage were the lowest in the 20-year abandoned farmland, and vegetation coverage and aboveground biomass were significantly lower than those of 15-year abandoned farmland; the dominant species for different farming-withdrawn grassland communities were: *Setaria viridis* and *Lespedeza davurica* for the 5-year, *L. davurica* and *Artemisia gmelinii* for 10-year and 15-year, *A. gmelinii* and *Potentilla tanacetifolia* for 20-year and *Stipa bungeana* for 30-year; there was a

收稿日期: 2019-08-19

修回日期: 2019-09-24

资助项目: 国家自然科学基金“黄土丘陵区退耕草地群落冠层降雨截留容量特征及其量化”(41771553)

第一作者: 贾昭(1993—), 男, 山西霍州人, 硕士研究生, 研究方向: 水土保持效益评价。E-mail: 1057600143@qq.com

通信作者: 徐炳成(1973—), 男, 安徽肥东人, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 草地建设与植被恢复。E-mail: Bcxu@ms.iswc.ac.cn

significant positive linear correlation between vegetation coverage and aboveground biomass, when vegetation coverage was less than 84.6%, and when the vegetation coverage was greater than 84.6%, the community coverage did not change with the increase of aboveground biomass. The values of vegetation coverage (84.6%) and aboveground biomass (285.17 g/m<sup>2</sup>) can be used as important references for vegetation restoration evaluation and control measure selection in loess hilly-gully region.

**Keywords:** farming-withdrawn grassland; vegetation coverage; vegetation composition; aboveground biomass

作为陆地生态系统的重要组成成分,植被在陆地表面的能量交换、生物地球化学循环和水文过程中扮演着重要角色<sup>[1]</sup>。在大范围、区域性的生态恢复和建设中,植被是防治水土流失最经济有效的手段。半干旱黄土丘陵区是黄土高原典型的生态脆弱区,自1999年退耕还林(草)政策实施以来,该区植被覆盖度明显增加,水土流失治理成效显著,生态环境质量明显改善<sup>[2-3]</sup>。群落盖度提供了与生态系统结构和过程相关的重要信息,其在土壤侵蚀预测与治理<sup>[4-5]</sup>、生态系统的养分和能量循环<sup>[6]</sup>、生态系统初级生产力估算<sup>[7-9]</sup>等方面具有重要指示作用,已成为退化群落监测和评价必不可少的指标。群落结构具有垂直和水平两个维度,而目前的投影盖度很难准确反映群落垂直结构特征,在评价和分析草地群落功能方面存在一定局限性。群落盖度是群落水平维度重要的结构特征指标<sup>[10]</sup>,群落高度是垂直维度重要的结构特征指标,二者结合能很好地反映植被对光能资源的利用能力,地上生物量则是植被光能利用能力的集中体现。不同植物种间的共存与竞争使群落发生次生演替,优势种往往控制着群落演替的速度和方向<sup>[11]</sup>。

退耕草地为黄土丘陵区实施退耕还林草政策后的主要植被类型,掌握退耕草地群落物种变化及初级生产力状况,对构建有效的防护草地群落、选择促进恢复调控的措施,来进一步提高草地水土保持效益具有重要意义。目前,针对退耕草地的研究很多,包括演替过程中植被形态、数量变化,物种多样性变化,植被—水分循环关系,植被—土壤养分迁移规律等<sup>[12-17]</sup>,但对植被盖度、物种组成与地上生物量间相互关系尚不多见。本研究选取黄土丘陵区不同退耕年限草地群落,通过比较群落盖度、物种组成与地上生物量特征,揭示草地群落盖度与地上生物量及物种构成的关系,以期评价该区退耕草地恢复特征,以及确定较为明确的草地效益评价和调控措施的参考奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区(108°5′44″—

109°26′18″E,36°30′45″—37°19′03″N),是典型黄土高原丘陵沟壑区,属暖温带半干旱气候区,年均降水量510 mm,年均温8.9℃,日照时数2 352~2 573 h,年均无霜期160 d。该区地形地貌复杂多样,境内沟壑纵横,平均海拔1 371.9 m,土壤类型以黄土母质上发育的黄绵土为主。植被地带分区为暖温带森林草原区。常见植被类型有以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和侧柏(*Platycladus orientalis*)等为主的人工林;灌丛主要有柠条(*Caragana korshinskii*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等人工林灌丛以及封禁后形成的杠柳(*Periploca sepium*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)和狼牙刺(*Sophora davidii*)、互叶醉鱼草(*Buddleja alternifolia*)等天然灌丛;草地主要为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、芨芨蒿(*Artemisia giraldii*)等组成的退耕草地。

### 1.2 样地设置

样地布设在安塞区沿河湾镇纸坊沟流域和陕西安塞农田生态系统国家野外科学观测研究站山地试验场。依据立地调查与居民走访,选择人为扰动较少且立地条件相似,退耕年限分别为5 a,10 a,15 a,20 a和30 a的草地群落为研究对象。每个群落设置一个样地,各样地基本信息见表1。在2017年6—9月,在每一个样地内,每月中旬随机选取4个1.0 m×1.0 m的样方,进行群落调查。

### 1.3 群落调查

主要包括群落物种组成、群落总盖度与分种盖度、群落地上生物量。

1.3.1 物种组成 通过识别、记录样方中所有植物种类和数量。对未能现场确定的植物,将其采集后带回实验室,查阅资料后确认。

1.3.2 群落平均高度 在样方中随机选取一种植物的三株个体,用卷尺自植株基部垂直量至植物自然直立状态的冠层最高点,即为该植株的高度<sup>[12]</sup>。取3个高度作为该种植物的平均高度,以多度为权重加权平均求得群落平均高度。

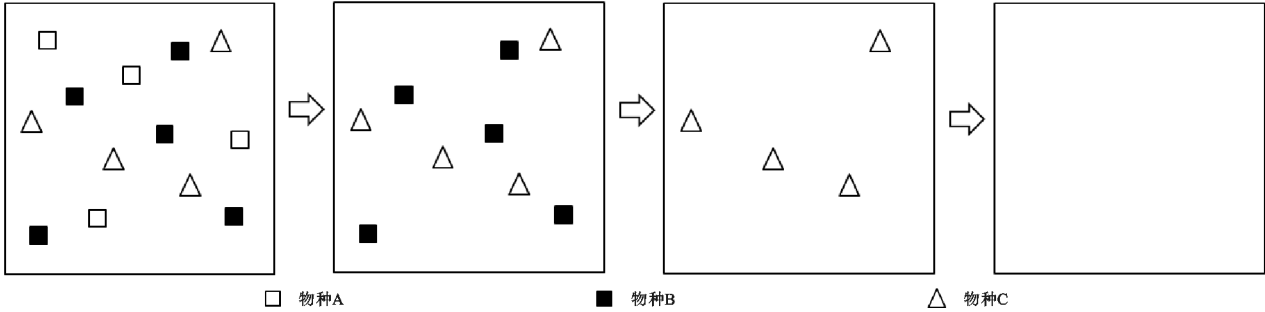
1.3.3 分种盖度 采用固定支架,在样方正上方约

1.8 m 处,先用数码相机(Canon PowerShotG7X)对样方进行垂直拍照,获得样方总盖度<sup>[18]</sup>。随后,齐地刈割一个物种后,再拍照获取剩余的群落(或物种)总盖度,以此类推,直至将最后一种植物物种刈割后,对

裸地进行拍照(图 1)。  
1.3.4 地上生物量 分种盖度测定过程中,将刈割采集的每个植物种分别装袋、标记后带回实验室,置于 75℃烘箱中烘 48 h 至恒重(g/m<sup>2</sup>)后称重<sup>[4]</sup>。

表 1 各退耕草地群落样地基本情况

退耕年限	经纬度	坡向	坡度/ (°)	海拔/ m	优势种	其他物种
5	109°14′32″E 36°44′32″N	E	22	1272	狗尾草( <i>Setaria viridis</i> ) 达乌里胡枝子	蒙古蒿( <i>Artemisia mongolica</i> )、苦苣( <i>Sonchus oleraceus</i> )、香青兰( <i>Dracocephalum moldavica</i> )
10	109°14′56″E 36°44′41″N	S	12	1168	达乌里胡枝子、铁杆蒿	白羊草、鹅观草( <i>Roegneria kamoji</i> )、菊叶委陵菜
15	109°14′45″E 36°44′44″N	N	23	1252	铁杆蒿、达乌里胡枝子	长芒草、甘草( <i>Glycyrrhiza uralensis</i> )、菱蒿
20	109°18′45″E 36°51′13″N	W25°N	20	1274	铁杆蒿、菊叶委陵菜 ( <i>Potentilla tanacetifolia</i> )	草木樨状黄芪( <i>Astragalus melilotoides</i> )、二裂委陵菜( <i>Potentilla bifurca</i> )、麻花头( <i>Serratula centauroides</i> )
30	109°14′45″E 36°44′44″N	E21°S	15	1234	长芒草、铁杆蒿	蒙古蒿、二裂委陵菜、菊叶委陵菜



注:每个图形代表一个物种。每次拍照后对其中一个物种进行刈割收集。

图 1 分种盖度测定示意图

1.3.5 群落多样性指数 用物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数来描述群落物种多样性特征,其中群落物种丰富度是以样方中的物种数量表示;Shannon-Wiener 多样性指数  $H'$  的计算公式为:

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \tag{1}$$

$$P_i = N_i / N \tag{2}$$

式中: $P_i$  为某物种相对多度; $N_i$  为群落中物种  $i$  的个体数; $N$  为群落中所有物种个体数。

1.3.6 单位盖度生物量(g/%) 为地上生物量与群落总盖度的比值(Aboveground biomass /Vegetation coverage,VA),该值越大说明单位植被覆盖面积上初级生产力越高。

1.4 数据分析

拍摄的植被(或物种)盖度照片采用 Photoshop CS6 软件进行处理,得到黑白图片后通过 Image-J 软件处理、计算得到样方群落盖度值<sup>[19]</sup>。数据采用 Microsoft Office 2013 处理,统计分析采用 SPSS 20.0。不同退耕年限间或者同一群落不同月份间草地群落地上生物量、盖度、物种丰富度和多样性参数差异显著性采用

Duncan 法检验( $p=0.05$ )。用 SigmaPlot 12.5 绘图并拟合地上生物量与群落盖度间关系。

2 结果与分析

2.1 退耕草地群落基本特征

黄土丘陵区退耕草地群落年均植物密度为 197~346 株/m<sup>2</sup>,退耕 10 a 最大,退耕 20 a 最小,不同退耕年限间无显著差异。退耕草地年均群落平均高度为 26.8~40.6 cm,退耕 5 a 最高,退耕 20 a 最低,退耕年限间无显著差异(表 2)。群落盖度、地上生物量以及 VA 值均随退耕年限增加而增加,三者均在退耕 20 a 出现下降,而退耕 30 a 草地盖度与地上生物量最大。群落高度与群落盖度均和地上生物量呈极显著正相关关系,但物种丰富度与多样性指数均与群落高度呈显著负相关性关系(表 3)。

2.2 退耕草地群落盖度与地上生物量月动态

草地群落盖度随退耕年限增加总体呈增加趋势,在 20 a 有所降低(55.7%),其中退耕 30 a 最高(71.1%),退耕 5 a 最低(46.1%)。群落盖度月动态无明显趋势,7

月、8 月相对较高(61.1%,63.7%),9 月较低(49.9%)。退耕 5 a 草地群落盖度 6 月最高,但不同月份间差异不显著( $p>0.05$ );退耕 10 a 草地群落的盖度 6 月显著最低( $p<0.05$ ),7—9 月间无明显差异;退耕 15 a 草地 6—9 月逐渐降低,但仅 6 月和 9 月间差异显著,9 月显著最低( $p<0.05$ );退耕 20 a 草地以 7 月显著最低,6 月与 8 月和 9 月间均无显著差异( $p<0.05$ );退耕 30 a 草地以 8 月最高,6—9 月份间均无显著差异。

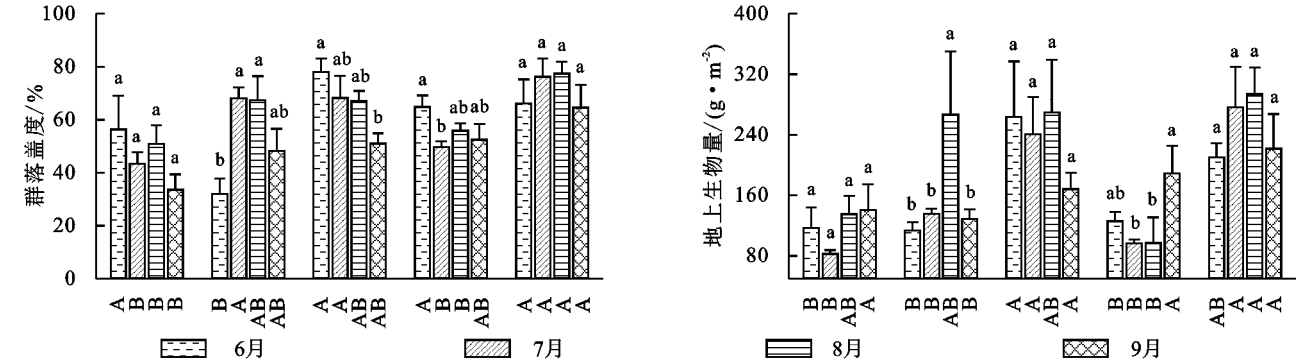
表 2 不同退耕年限草地群落基本特征

退耕年限	植物密度/ (株·m <sup>-2</sup> )	群落平均 高度/cm	群落 盖度/%	地上生物量/ (g·m <sup>-2</sup> )	单位盖度生物量/ (g·% <sup>-1</sup> )
5	251±82.97	40.6±1.44	46.1±4.95	118.8±13.07	2.7±0.52
10	346±37.25	31.2±1.42	50.2±10.09	164.1±34.76	3.4±0.50
15	230±20.98	35.8±0.85	66.1±5.60	235.6±23.33	3.6±0.16
20	197±14.66	26.8±0.73	55.7±3.29	127.2±21.79	2.3±0.43
30	322±27.08	32.5±1.32	71.1±3.32	250.5±20.43	3.5±0.13

表 3 植被密度、群落平均高度、盖度与地上生物量间相关性分析

项目	植物 密度	群落 高度	地上 生物量	群落 盖度	物种 丰富度	Shannon-Wiener 多样性
植物密度	1					
群落高度	-0.077	1				
地上生物量	0.376	0.549**	1			
群落盖度	0.206	0.049	0.690**	1		
物种丰富度	-0.019	-0.482*	-0.199	-0.116	1	
Shannon-Wiener 多样性指数	0.116	-0.541*	0.064	0.227	0.439	1

注: \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。



注: 不同小写字母表示同一退耕年限月份间差异显著;不同大写字母表示同一月份退耕年限间差异显著。

图 2 不同退耕年限草地群落盖度和地上生物量月变化

2.3 物种组成及优势种盖度与地上生物量

样方调查结果显示,黄土丘陵区退耕草地群落中共出现 28 种草本植物(表 1),其中多年生草本 22 种,一年生草本 6 种,分属于 9 科。其中菊科植物最多(9 种),豆科 6 种,禾本科 6 种,蔷薇科 2 种、败酱科、唇形科、堇菜科、牻牛儿苗科和毛茛科各 1 种植物。退耕 5 a,10 a,15 a 和 20 a 的草地群落间物种丰富度无明显差异,退耕 30 a 出现下降(表 3)。退耕 5 a 草地群落以 8 月丰富度最高,6 月显著最低( $p<0.05$ );退耕 30 a 以 8 月丰富度较高,6 月显著最低( $p<0.05$ )。Shannon-

随退耕年限延长,草地群落地上生物量呈增加趋势,在退耕 20 a 时出现减少( $127.2\text{ g/m}^2$ ),以退耕 30 a 最高( $250.5\text{ g/m}^2$ ),退耕 5 a 最低( $118.8\text{ g/m}^2$ )。退耕 5 a 的草地群落地上生物量 9 月最高,但不同月份间无显著差异( $p>0.05$ );退耕 10 a,15a 和 30 a 草地群落 8 月地上生物量均最高,但各年限的月份间无差异( $p>0.05$ );退耕 20 a 草地以 9 月最高,7 月显著最低( $p<0.05$ ),月份间无差异(图 2)。

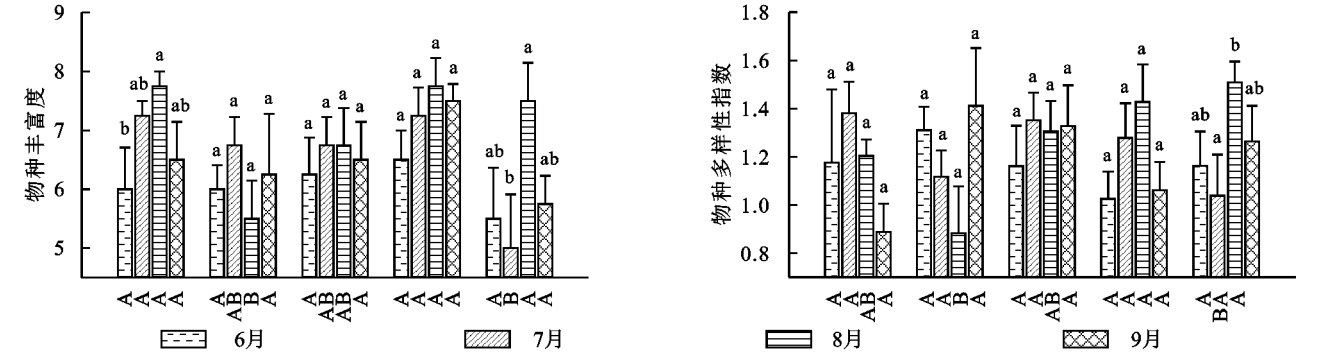
Wiener多样性指数在不同退耕年限之间无明显差异,退耕 5 a,10 a,15 a 和 20 a 草地群落的物种多样性指数月份间无差异( $p>0.05$ );退耕 30 a 草地以 8 月多样性指数最高,7 月显著最低( $p<0.05$ )(图 3)。

以各物种地上生物量和分种盖度为依据,选取占比均为前五的植物作为群落优势植物(图 4)。退耕 5 a 草地优势种为狗尾草、达乌里胡枝子和蒙古蒿,伴生种有苦苣、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)和香青兰等。6—9 月,狗尾草的盖度和地上生物量均呈显著增加趋势,而达乌里胡枝子呈下降趋势。退耕 10 a 草地优势种为达



乌里胡枝子、铁杆蒿和长芒草,伴生种有白羊草、鹅观草和菊叶委陵菜等;6—9 月,铁杆蒿的盖度和生物量随生长月份呈波动趋势,而达乌里胡枝子呈先增后降的趋势。退耕 15 a 草地群落的优势种为铁杆蒿、达乌里胡枝子和长芒草,伴生种有甘草、芨蒿和草木樨状黄芪等;6—9 月,铁杆蒿盖度和生物量先减后增,达乌里胡枝子呈增加趋势,二者盖度和生物量均在 8 月达到最大。退耕 20 a 草地群落优势种为铁杆蒿、菊叶

委陵菜和达乌里胡枝子,伴生种有二裂委陵菜、麻花头 and 草木樨状黄芪等;6—9 月,铁杆蒿的盖度和地上生物量逐渐增加,但菊叶委陵菜逐渐降低。退耕 30 a 草地群落优势种为长芒草、铁杆蒿和达乌里胡枝子,伴生有蒙古蒿、二裂委陵菜和菊叶委陵菜等;7 月长芒草盖度和地上生物量最低,8 月铁杆蒿盖度与地上生物量明显高于长芒草和达乌里胡枝子,9 月达乌里胡枝子盖度和地上生物量最低。



注:不同小写字母表示同一退耕年限下月份间差异显著;不同大写字母表示同一月份退耕年限间差异显著。

图 3 不同退耕年限草地群落物种丰富度和多样性指数月变化

2.4 退耕草地群落盖度与地上生物量回归分析

由表 3 可知,草地群落盖度与地上生物量间存在极显著正相关关系,对所有样方群落盖度与地上生物量进行回归分析表明(表 4),线性、对数、二次和幂函数回归方程中,对数函数与二次函数的决定系数最高。群落盖度与地上生物量受环境资源限制不可能无限增长,故认为盖度与地上生物量间存在着二次函数关系式。对该二次函数关系式计算表明,当 X(地上生

物量)=435.2 g/m<sup>2</sup>时,Y(群落盖度)=84.2%为函数拐点,即地上生物量继续增加,盖度无变化。对该顶点左右盖度接近最大值的 14 个点进行拟合回归直线为 Y=84.607,说明群落盖度与地上生物量间存在两种回归模式。对盖度值低于 76.0%的 63 个值进行相关性分析及回归分析得出(表 4),分段校正后的回归方程决定系数高于未校正回归方程,表明校正后的回归方程对二者关系表达更精确,且线性函数优于二次函数。

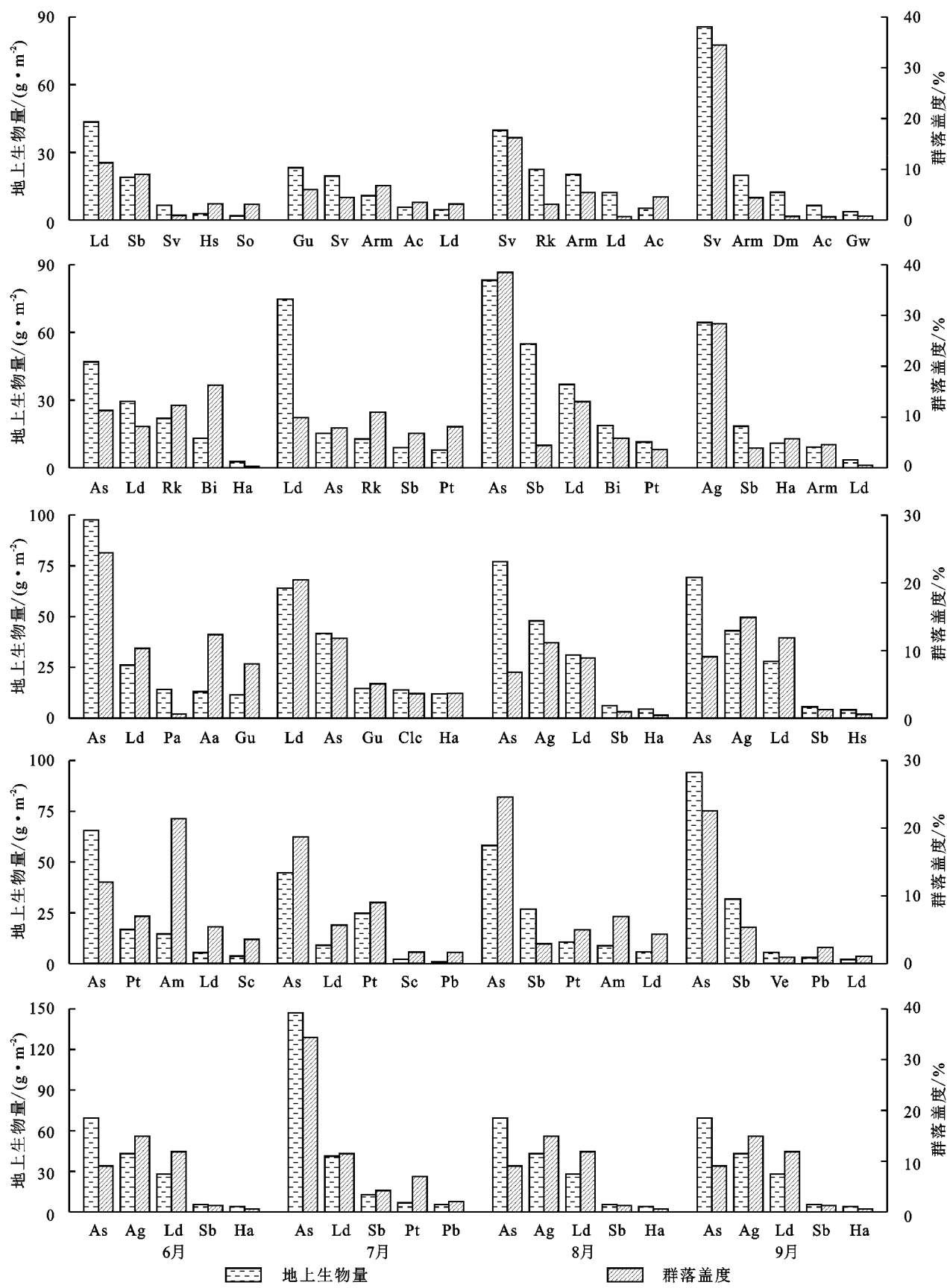
表 4 群落盖度与地上生物量回归分析

回归方程		样本量	表达式	R <sup>2</sup>	F	p
线性		77	Y=0.124X+36.122	0.457	64.773	p<0.001
	对数	77	Y=27.026lgX-78.835	0.523	84.487	p<0.001
	二次	76	Y=-0.000347X <sup>2</sup> +0.302X+18.473	0.519	41.049	p<0.001
	幂	77	Y=X <sup>0.124</sup> +36.122	0.483	71.841	p<0.001
第一段	线性	57	Y=0.222X+21.299	0.581	78.894	p<0.001
	二次	56	Y=-0.000084X <sup>2</sup> +0.286X+16.533	0.583	39.169	p<0.001
第二段	线性	14	Y=84.607	0.000	0.000	p>0.05

3 讨论

高大植物对下层植物的遮蔽,掠夺了部分低矮不耐阴植物的生存空间,导致物种丰富度和多样性指数下降,这会促使群落中物种组成不断向更高的物种演化<sup>[20]</sup>,但高度增大会增加植物生长消耗,导致光能利用率(单位光截获量与生物量比值)降低<sup>[21]</sup>。从生长季内光能利用率来看,中等个体植物更能在有限光能的冠层中积累更多的生物量,竞争能力更强,易成为群落优势种。本研究中,随退耕年限延长,群落平均高

度在 26.8~40.6 cm 间波动,物种丰富度和 Shannon-Wiener 在 5~9,0.8~1.8 之间波动,表明中等个体植物所占权重较大,群落物种数量保持动态稳定。草地群落高度与地上生物量呈显著正相关关系,主要是较高物种有更大空间获取光能,往往是群落地上生物量的主要贡献类群<sup>[22]</sup>。但群落高度与物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数呈显著负相关关系,可能与群落中光资源竞争有关,较高植物单位面积光截获量高于矮小植物,这种光能不对称性加速了物种间的竞争排斥速率,从而减少物种多样性<sup>[23]</sup>。



注:Ld:达乌里胡枝子;As:铁杆蒿;Sb:长芒草;Sv:狗尾草;Gu:甘草;Arm:蒙古蒿;Ac:茵陈蒿;Dm:香青兰;Gw:老鹳草 *Geranium wilfordii*;Rk: 鹅观草;Bi:白羊草;Pt:菊叶委陵菜;Ha:阿尔泰狗娃花 *Heteropappus altaicus*;Aa:沙打旺 *Astragalus adsurgens*;Clc:中华隐子草 *Cleistogenes chinensis*;Ve:紫花地丁 *Viola yedoensis*;Pb:二裂委陵菜;So:苦苣;Ag:芡蒿;早熟禾 *Poa annua*。

图 4 各退耕年限草地群落优势种植物盖度、生物量月动态

多数研究表明,草地群落盖度、高度、地上/地下生物量比、物种多样性等会随演替时间延长而增加,草地结构不断优化和生产力逐渐提升,说明退耕或封育利于草地生态系统的恢复<sup>[12-16]</sup>。本研究中,退耕 20 a 草地群落的植物密度、高度和 VA 值均最低,盖度与地上生物量也出现明显下降(表 2、图 3)。这可能与演替过程中不同植物对资源需求的类型及其竞争强度的变化有关,如单贵莲等<sup>[16]</sup>对内蒙恢复草地研究指出演替进行至第 13 年后群落盖度、密度、地上/地下生物量开始下降。苗福泓等<sup>[17]</sup>对青藏高原封育草地的研究得出第 6 年时出现逆行演替现象。恢复草地持续演替至中期出现退化的现象,可能与植物种间竞争加剧以及土壤有机碳、氮消耗过快有关<sup>[24-27]</sup>。退耕 20 a 物种丰富度和多样性指数最大,此时群落中植物种类最为丰富,植物数量多,各物种间竞争强烈(图 2)。植物种类与密度增加将导致对土壤碳、氮消耗增加,但群落植物凋落或根系周转产生有机物质的积累速率不足以满足植物吸收消耗的速率,导致土壤养分供应短缺<sup>[24]</sup>。根茎功能平衡理论认为,土壤资源供应不足将导致生物量更多地向地下根系中转移,导致地上生物量减少<sup>[25]</sup>。也有研究认为,长期封育下土壤表层大量凋落物累积降低了土壤有机碳周转率,导致土壤温度升高,土壤入渗与蒸发受限使得土壤水分有效性下降,都对地上生产力形成产生负面影响<sup>[26]</sup>。因此,有必要对退耕 20 a 草地根冠关系与土壤养分状况进行系统分析,以及探讨合理的调控措施对该年限群落物种组成和恢复进程的影响。

群落盖度与地上生物量随退耕年限增加总体呈增加趋势,而物种丰富度和多样性指数在不同年限间无显著变化,其中群落中物种丰富度基本保持在 5~10 种,且物种组成出现明显的周期性和嵌套现象<sup>[27]</sup>。退耕初期,受过去耕作的影响,退耕地土质疏松、土壤养分含量少且集中于表层<sup>[8]</sup>,使得一年生浅根系植物更容易存活而最先侵入。禾本科植物具有较强的捕获光和营养物质的能力,使其在恢复演替早期资源丰富环境中具有更强竞争力<sup>[28]</sup>。本研究中,狗尾草 6—9 月期间盖度和生物量均逐渐增大,在早期退耕草地群落中占据优势地位(表 1)。随退耕年限延长,狗尾草消失。铁杆蒿成为退耕 10~20 a 草地群落主要优势种,其在群落中的盖度和地上生物量均较高(5.9%~34.4%,15.3 g/m<sup>2</sup>~147.2 g/m<sup>2</sup>),盖度和地上生物量权重分别为 12.2%~67.1%和 11.3%~58.1%,表明铁杆蒿对群落盖度和地上生物量的贡献起着决定性作用(表 1)。铁杆蒿为菊科多年生半灌木草本植物,具有抗旱能力强、根孽发达、繁殖力强的特点,

使其成为黄土丘陵区草地群落分布最广的物种之一<sup>[29-30]</sup>。退耕 30 a 后,以禾本科多年生丛生植物长芒草为优势种,铁杆蒿为次优势种(群落中铁杆蒿盖度与地上生物量占比为 25.1%和 35.7%,长芒草为 21.1%和 25.9%),群落盖度、地上生物量、物种丰富度和多样性指数均达到最大值,群落达到相对稳定阶段(表 1、图 4),说明作为优势种的铁杆蒿和长芒草能大大提高群落盖度和生物量水平。但铁杆蒿和长芒草的 VA 均最低(0.27,0.33),其原因是铁杆蒿为半灌木类,虽然植株较高,但叶片生物量占比较少,生物量主要储存在茎中,因此铁杆蒿群落盖度值最大时,其地上生物量依旧在增加。长芒草为多年生密丛下繁草,叶片生物量的不断累积对盖度影响较小。这是以铁杆蒿和长芒草为优势种草地群落的盖度不再随地上生物量增加而增大的重要原因(图 5)。

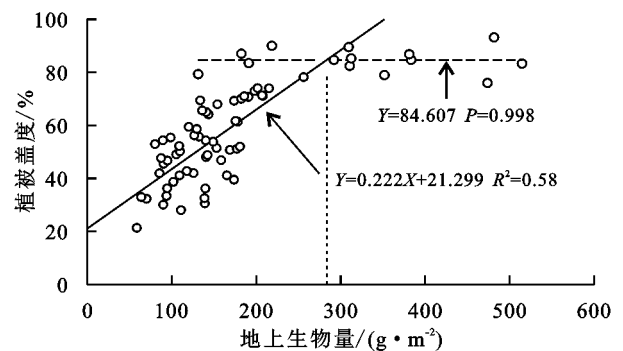


图 5 退耕草地群落盖度和地上生物量的拟合关系

退耕草地群落盖度与地上生物量关系可反映草地生态系统的资源吸收交换能力,覆盖度高的群落内的不同生活型物种组合对资源的利用效率往往比覆盖度低的群落高<sup>[31]</sup>。群落高度和盖度与地上生物量呈显著正相关关系,与物种丰富度和多样性指数呈显著负相关关系,说明提高群落高度和盖度能显著增加群落地上生物量,但降低了物种多样性(表 2)。多数研究证实,群落盖度与地上生物量存在正相关关系,其中线性关系和幂函数关系最为常见<sup>[32-34]</sup>。当草地群落盖度为 21.1%~84.3%,生物量为 131.4~285.2 g/m<sup>2</sup>时,盖度与地上生物量间呈极显著线性正相关关系,当盖度值达到 84.6%,地上生物量高于 285.2 g/m<sup>2</sup>时,随着生物量增加草地群落盖度基本不变,说明草地群落盖度与地上生物量间存在不对称关系的拐点(图 5)。根据黄土高原目前的植被恢复范围和人们对水资源的需要,Feng 等认为黄土高原地区地上净初级生产力的上限值为(400±5) g C/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[34]</sup>。本研究中,退耕 5—30 a 的草地群落地上生物量为 118.8~250.5 g/(m<sup>2</sup>·a),也有研究得出黄土丘陵区草地群落地上净初级生产力为 131.1~370.0 g/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[12,14,35-37]</sup>,均低于 Feng

等<sup>[34]</sup>提出的阈值,这种差异与研究对象和年限有关,有必要继续对不同地域和不同植被类型间地上生物量与盖度及物种组成关系进行研究。

## 4 结论

(1) 黄土丘陵区退耕草地群落高度、盖度与地上生物量间呈显著正相关关系,与物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数呈显著负相关关系。草地群落盖度与地上生物量随退耕年限增加总体呈增加趋势,物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数在不同退耕年限间无显著差异。

(2) 退耕 20 a 草地群落的植物密度、高度和 VA 值均最低,盖度和地上生物量显著下降,出现演替中期退化现象,应适当采取措施以调整群落物种组成,加快草地恢复进程。

(3) 不同退耕年限物种数量基本一致,随着退耕年限延长仅表现为优势种的更替。退耕 5 a 群落以狗尾草和达乌里胡枝子为优势种,退耕 10 a 和 15 a 以达乌里胡枝子和铁杆蒿为优势种,退耕 20 a 以铁杆蒿和菊叶委陵菜为优势种,退耕 30 a 以长芒草为优势种。

(4) 退耕草地群落植被盖度与地上生物量间存在阈值响应关系。当群落盖度低于 84.6% 时,地上生物量随盖度增加快速增加;当盖度大于 84.6%,群落地上生物量与盖度无相关性。群落盖度 84.6% 和地上生物量 285.2 g/m<sup>2</sup> 可作为黄土丘陵区草地植被恢复评价和调控措施选择的参考值。

### 参考文献:

- [1] 张云霞,李晓兵,陈云浩.草地植被盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述[J].地球科学进展,2003,18(1):85-93.
- [2] Sun W, Song X, Mu X, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015,209(1):87-99.
- [3] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017,247:260-270.
- [4] 贾昭.黄土丘陵区退耕草地群落盖度与物种组成及地上生物量关系研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [5] 韦红波,李锐,杨勤科.我国植被水土保持功能研究进展[J].植物生态学报,2002,26(4):489-496.
- [6] Breckenridge R P, Dakins M, Bunting S, et al. Comparison of unmanned aerial vehicle platforms for assessing vegetation cover in sagebrush steppe ecosystems[J]. Rangeland Ecology and Management, 2011,64(5):521-532.
- [7] Rottgermann M, Steinlein T, Beyschlag W, et al. Linear relationships between aboveground biomass and plant cover in low open herbaceous vegetation[J]. Vegetation Science, 2000,11(1):145-148.
- [8] Macdonald R L, Burke J, Chen H, et al. Relationship between aboveground biomass and percent cover of ground vegetation in Canadian Boreal Plain riparian forests [J]. Forest Science, 2012,58(1):47-53.
- [9] Fern R R, Foxley E A, Andrea B, et al. Suitability of NDVI and OSAVI as estimators of green biomass and coverage in a semi-arid rangeland [J]. Ecological Indicators, 2018,94:16-21.
- [10] 张光辉,梁一民.植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J].水土保持研究,1996,3(2):104-110.
- [11] Symstad A J. A Test of the effects of functional group richness and composition on grassland invasibility[J]. Ecology, 2000,81(1):99-109.
- [12] 师阳阳,陈云明,张光辉,等.不同退耕年限撂荒地植物多样性及生物量分析[J].水土保持研究,2012,19(6):36-40.
- [13] 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[J].草业学报,2016,25(10):31-39.
- [14] 杜峰,梁宗锁,徐学选.陕北黄土丘陵区撂荒地群落生物量及植被土壤养分效应[J].生态学报,2007,27(5):1673-1683.
- [15] 郝红敏,刘玉,王冬,等.典型草原开垦弃耕后不同年限群落植物多样性和空间结构特征[J].草地学报,2016,24(4):754-759.
- [16] 单贵莲,徐柱,宁发.典型草原不同演替阶段群落结构与物种多样性变化[J].干旱区资源与环境,2010,24(2):163-169.
- [17] 苗福泓,郭雅婧,缪鹏飞,等.青藏高原东北边缘地区高寒草甸群落特征对封育的响应[J].草业学报,2012,21(3):11-16.
- [18] 任杰,柏延臣,王锦地.从数码照片中快速提取植被覆盖度的方法研究[J].遥感技术与应用,2010,25(5):719-724.
- [19] 池宏康,周广胜,许振柱,等.草地植被盖度的近距离遥感测定[J].草业学报,2007,16(2):105-110.
- [20] Givnish T J. On the adaptive significance of leaf height in forest herbs[J]. the American Naturalist, 1982,120(3):353-381.
- [21] Werger M J A, Hirose T, During H J, et al. Light partitioning among species and species replacement in early succession grasslands[J]. Journal of Vegetation Science, 2002,13(5):615-626.
- [22] Weiner S J. Mechanisms determining the degree of size asymmetry in competition among plants[J]. Oecologia, 1998,113(4):447-455.



- [23] Miller T E, Goldberg D E. Effects of different resource additions of species diversity in an annual plant community[J]. Ecology, 1990,71(1):213-225.
- [24] 郭曼,郑粉莉,和文祥,等.黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J].土壤学报,2010,47(5):979-986.
- [25] Wu L, He N, Wang Y, et al. Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil after grazing exclusion in *Legmus chinensis* grasslands of Northern China[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(2): 663-668.
- [26] Bai Y F, Han X G, Wu J G, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland[J]. Nature, 2004,431(7005):181-184.
- [27] 杜峰,山仑,梁宗锁,等.陕北黄土丘陵区撂荒演替生态位研究[J].草业学报,2006,15(3):27-35.
- [28] 郝文芳,杜峰,陈小燕,等.黄土丘陵区天然群落的植物组成、植物多样性及其与环境因子的关系[J].草地学报,2012,20(4):609-615.
- [29] 周萍,刘国彬,侯喜禄.黄土丘陵区铁杆蒿群落植被特性及土壤养分特征研究[J].草业学报,2008,17(2):9-18.
- [30] Kusuma P, Dean-Hively W, McCarty G W. Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015,39:88-102.
- [31] Ji S J, Geng Y, Li D F, et al. Plant coverage is more important than species richness in enhancing aboveground biomass in a premature grassland, northern China [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2009,129(4):491-496.
- [32] 袁晓波,牛得草,吴淑娟,等.黄土高原典型草原地上生物量估测模型[J].生态学报,2016,36(13):4081-4090.
- [33] Jiang Y B, Zhang Y J, Wu Y P, et al. Relationships between aboveground biomass and plant cover at two spatial scales and their determinants in northern Tibetan grasslands[J]. Ecology and Evolution, 2017,7(19): 7954-7964.
- [34] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11):1019-1022.
- [35] Jackson R B. Trading water for carbon with biological carbon sequestration [J]. Science, 2005, 310(5756): 1944-1947.
- [36] 方昭,张少康,刘海威,等.黄土丘陵区草本群落生物量空间分布格局及其影响因素[J].草业学报,2018,27(2):26-35.
- [37] 周萍,刘国彬,侯喜禄.黄土丘陵区不同坡向及坡位草本群落生物量及多样性研究[J].中国水土保持科学, 2009,7(1):67-73.

(上接第 318 页)

- [32] 陆俐呐,葛察忠,林爱军,等.基于生态足迹和生态承载力的湖北省利川市可持续发展研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(S2):124-129.
- [33] 张佳琦,段玉山,伍燕南.基于生态足迹的苏州市可持续发展动态研究[J].长江流域资源与环境,2015,24(2):177-184.
- [34] 刘某承.中国生态足迹的时间动态与空间格局[M].北京:化学工业出版社,2014.
- [35] 刘某承,李文华.基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算[J].生态与农村环境学报,2010,26(5):401-406.
- [36] 王祥荣,樊正球,谢玉静,等.城市群生态安全保障关键技术研究与集成示范:以长三角城市群为例[J].生态学报,2016,36(22):7114-7118.
- [37] 黄羿,杨林安,张正栋,等.基于“国家公顷”生态足迹模型的广东省生态安全研究[J].生态经济,2012(7):47-51,56.
- [38] 何爱红.中国中部地区的生态足迹与可持续发展研究[M].北京:中国社会科学出版社,2013.
- [39] 薛若晗.基于“国家公顷”的生态足迹模型研究[J].安徽农业科学,2014,22(22):7318-7320.
- [40] 李智强,吴诗嫚.基于“国家公顷”生态足迹模型的土地可持续利用研究:以抚州市为例[J].开发研究,2011(4):59-63.
- [41] 刘运伟,赵亚玲,廖仕梅.基于生态足迹理论的欠发达民族山区生态安全动态研究:以四川凉山彝族自治州为例[J].生态科学,2015,34(1):142-147.
- [42] Wang Z H, Yang L, Yin J H, et al. Assessment and prediction of environmental sustainability in China based on a modified ecological footprint model[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018,132:301-313.
- [43] 陈晨,夏显力.基于生态足迹模型的西部资源型城市可持续发展评价[J].水土保持研究,2012,19(1):197-201.