

DOI: 10.5846/stxb201409241892

王一贺, 赵允格, 李林, 高丽倩, 胡忠旭. 黄土高原不同降雨量带退耕地植被-生物结皮的分布格局. 生态学报, 2016, 36(2): 377-386.

Wang Y H, Zhao Y G, Li L, Gao L Q, Hu Z X. Distribution patterns and spatial variability of vegetation and biocrusts in revegetated lands in different rainfall zones of the Loess Plateau region, China. Acta Ecologica Sinica 2016, 36(2): 377-386.

# 黄土高原不同降雨量带退耕地植被-生物结皮的分布格局

王一贺<sup>1,3</sup>, 赵允格<sup>1,2,\*</sup>, 李林<sup>2</sup>, 高丽倩<sup>1,3</sup>, 胡忠旭<sup>2</sup>

1 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 黄土高原退耕还林工程实施后, 高等维管束植物恢复的同时, 生物结皮大面积发育。然而, 两者共同发育下的分布格局及空间变异却鲜有报道。通过野外调查, 研究了黄土高原不同降雨量带退耕地上植被盖度、维管束植物斑块面积、个数、生物结皮组成、盖度及其空间变化。结果表明: 1) 在黄土高原降水量 250—550 mm 地区的退耕地及自然荒坡上, 维管束植物与生物结皮共同存在, 呈镶嵌分布。生物结皮多呈连续分布, 可视为被镶嵌体, 维管束植物多以斑块状存在, 可视为镶嵌体。2) 黄土高原生物结皮盖度变化于 80.8%—55.1% 之间, 在不同降雨量带之间差异显著, 250—350 mm 降雨量带生物结皮平均盖度 (77.8%) 显著高于 350—500 mm 降雨量带 (60.3%), 但不同类型生物结皮盖度差异显著性不同。3) 黄土高原地区不同降雨量带维管束植物冠层盖度变化于 10.0%—58.7%, 随降雨量的增加而增加, 一定程度上限制了生物结皮的发育和演替, 两者表现出了“此消彼长”的关系。4) 随着降雨量的增加, 高等维管束植物茎基斑块间的距离逐步减小, 维管束植物覆被增加。研究结果数量化的揭示了黄土高原不同降雨量带退耕地上维管束植物与生物结皮的镶嵌式分布格局及其空间变异特征。

**关键词:** 生物结皮; 维管束植物; 斑块; 降雨量带; 镶嵌分布

## Distribution patterns and spatial variability of vegetation and biocrusts in revegetated lands in different rainfall zones of the Loess Plateau region, China

WANG Yihe<sup>1,3</sup>, ZHAO Yunge<sup>1,2,\*</sup>, LI Lin<sup>2</sup>, GAO Liqian<sup>1,3</sup>, HU Zhongxu<sup>2</sup>

1 Research Center of Institute of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences / State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, China

2 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Biological soil crusts (biocrusts) were extensively recovered on the surface of revegetated lands after the implementation of the “Grain for Green” Project, which is a program for retransforming croplands on steep slopes ( $\geq 25^\circ$ ) into grasslands and shrublands in order to restore ecosystem functions in the Loess Plateau region. The distribution patterns and spatial variability of biocrusts and vascular plants in the revegetated lands in this region have rarely been considered in previous studies. The coverage, patch size, and number of vascular plants as well as biocrust cover and composition were investigated in six successive rainfall zones ranging from 250 mm to 550 mm in the Loess Plateau region so as to determine the distribution patterns and their spatial variation. The following observations were made from the results: 1) Revegetated

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271298); 中国科学院“西部之光”联合学者项目

收稿日期: 2014-09-24; 修订日期: 2015-07-09

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyunge@ms.iswc.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

lands showed a mosaic pattern of vascular plants and biocrusts across the rainfall gradient. Biocrusts were mostly distributed continuously within each site, while vascular plants often existed in patchy mosaics. 2) Biocrust coverage in different rainfall zones in the region ranged between 55.1% and 80.8%. The average biocrust coverage in the 250—350 mm rainfall zone was 77.8%, which was significantly higher than that in the 350—500 mm rainfall zone (60.3%). However, no significant difference was observed in the community composition of biocrust along this gradient. 3) Vascular plant coverage in the region ranged from 10.0% to 58.7%. An obvious and significant increasing trend was observed in the coverage along with the increase of annual mean precipitation. 4) Total and average basal patch area of vascular plants also increased along with annual mean precipitation, while the number of individual plants decreased. Given this general trend, the smallest plants (basal radii < 0.1 cm) dominated the plant patch-size distributions in all the rainfall zones. These results reveal the intercorrelation of spatial pattern and distribution of biocrusts and vascular vegetation across environmental gradients in the Loess Plateau region.

**Key Words:** biological soil crust; vegetation; patchiness; different rainfall region; mosaic distribution

水土流失是黄土高原地区最严重的生态问题<sup>[1-2]</sup>。植被是防止水土流失的积极因素<sup>[1]</sup>。大量研究表明,植被类型、盖度、枯枝落叶层、根系等均是影响土壤侵蚀的重要因素<sup>[3-5]</sup>。近年来,黄土高原地区退耕还林(草)生态修复工程实施,维管束植物盖度逐渐增加<sup>[6-8]</sup>,一方面增加拦截降雨量,降低降雨侵蚀力。另一方面,维管束植物枯枝落叶可以保护土壤免受或减轻雨滴的直接打击以及对土壤的剥离,有效拦截地表径流,减缓其流速,降低其剥蚀能量,减少细沟或切沟侵蚀发生的机会<sup>[9]</sup>。维管束植物还能够改善表土的土壤结构、物理化学和水文性质<sup>[10]</sup>以及微地形等,进而影响水土流失。

生物土壤结皮(简称生物结皮)是由隐花植物如蓝绿藻、地衣、苔藓类和土壤中的微生物,以及相关的其它生物体通过菌丝体、假根和分泌物等与表层土壤颗粒胶结形成的十分复杂的复合体,是干旱半干旱荒漠地表景观的重要组成部分之一<sup>[11-13]</sup>。退耕还林(草)实施后,生物结皮成为黄土丘陵区退耕地上普遍存在的地被物,盖度可以达到60%—70%<sup>[14]</sup>,与维管束植物同时演替,共同存在,共同影响退耕地的水土流失。目前,已有不少研究关注了黄土高原地区退耕地的维管束植物与生物结皮的恢复、演替及其对坡地水土流失的影响,但已有的研究多将两者分别研究,一方面,很多研究关注了退耕后维管束植物的恢复、演替及分布,认为植物群落的多样性指数、丰富度指数、均匀度指数均有上升趋势<sup>[15-18]</sup>。另一方面,又有很多研究关注了该区退耕后生物结皮的演替、分布及对水土流失的影响,发现生物结皮较裸地增加了径流量,增加了土壤抗蚀性<sup>[14,19]</sup>,减少土壤流失,降低了土壤容重、增加了田间持水量和表层土壤粘聚力<sup>[20]</sup>、增加表层土壤的贮水保水能力等<sup>[21]</sup>。

自然条件下,维管束植物与生物结皮共同存在,呈镶嵌式分布。维管束植物和生物结皮对地表覆被的差异性以及对土壤抗侵蚀性及水分入渗的影响,必然造成维管束植物和生物结皮对坡面降雨产流产沙的影响方式和程度存在显著差异。目前国内外有关维管束植物与生物结皮的相关研究尚不能揭示维管束植物与生物结皮共同影响下坡面水土流失规律。回答这一问题的关键是明晰坡面维管束植物和生物结皮的空间分布格局。为此,本文通过野外调查,对比分析黄土高原不同降雨量带退耕地生物结皮与维管束植物的盖度、维管束植物斑块个数与面积等,揭示研究区退耕地维管束植物与生物结皮空间分布特征及其互动关系,为科学评估退耕还林后植物及生物结皮对水土流失的影响提供科学依据。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原位于32°—41°N,107°—114°E之间,宏观地貌类型有丘陵、高塬、阶地、平原、沙漠、干旱草原、高地草原、土石山地等,其中山区、丘陵区、高塬区占2/3以上。属大陆性季风气候,冬春季受极地干冷气团影响,寒冷干燥多风沙;夏秋季受西太平洋副热带高压和印度洋低压影响,炎热多暴雨。黄土高原地区全年

$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  的积温 2300—4500  $^{\circ}\text{C}$ , 无霜期 120—250 d, 日照时数 1900—3200 h。降水地区分布很不平衡, 降雨量总的趋势是由东南向西北、由山地向平地递减<sup>[22]</sup>。全区植被稀疏, 覆盖率低, 天然次生林和天然草地面积很少。近年来, 由于退耕还林(草)工程的实施, 植被覆盖度增大, 据水利部黄委会遥感监测中心对陕西延安、榆林地区的监测结果表明, 从 1997 年 7 月到 2002 年 5 月年间, 该地区植被覆盖度提高了 8.45%; 据宁夏隆德县水利局水保站的观测结果, 坡耕地退耕还林(草)后, 土壤侵蚀模数比退耕前降低了  $1400\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。自 1999 年开始, 到 2003 年末, 黄土高原退耕还林(草)面积达到 173.8 万  $\text{hm}^2$ , 加上宜林荒山荒坡造林(草)面积 229.1 万  $\text{hm}^2$ , 黄土高原还林(草)面积已达 402.9 万  $\text{hm}^2$ <sup>[22]</sup>。

按中国科学院《中国自然地理》编辑委员会提出的中国气候区划(1984), 黄土高原分属 3 个气候区, 即南部和东部为暖温带亚湿润气候区, 北部为中温带亚干旱气候区和西部为中温带干旱气候区。黄土高原年降雨量为 150—750 mm。位于本区东南部的汾渭盆地和晋南、豫西黄土丘陵地区, 年降雨量为 600—750 mm, 是区内降雨量最丰沛的地区; 位于西部和西北部的宁夏、内蒙古黄河沿岸地带、鄂尔多斯高原西部、甘肃靖远—景泰—永登一线, 年降雨量为 150—250 mm, 是区内降雨量最稀少的地区。

## 1.2 调查方法

### 1.2.1 样地选择

在降雨量 200—600 mm 之间的地区, 以降雨量等值线图为准<sup>[23]</sup>, 按年降雨量 50 mm 的梯度, 从东南到西北, 将研究区划分为 8 个降雨量带, 选择其中的 6 个连续的降雨量带, 分别为 250—300 mm(宁夏回族自治区盐池县县城北)、300—350 mm(陕西省定边县盐场堡乡)、350—400 mm(陕西省定边县杨井乡)、400—450 mm(陕西省吴起县新寨乡)、450—500 mm(陕西省吴起县杨青沟)、500—550 mm(陕西省志丹县永宁镇), 调查生物结皮物种组成及盖度、高等植被盖度和群落特征等。研究区土壤主要有风沙土(200—300 mm 降雨量带)和黄绵土(300—600 mm 降雨量带)。调查样地主要为退耕撂荒地, 特殊情况下选择 10 a 以上封禁荒坡或封禁人工林。由于黄土高原退耕地生物结皮的发育和演替具有其特殊的规律, 一般在排除人为重复干扰的情况下, 退耕 1—4 a 为生物结皮快速形成期, 以藻结皮为主, 5—8 a 为快速发育期, 此时, 阳坡依旧以藻结皮为主, 只是发育程度更为完善, 阴坡藓类植物盖度快速增加, 退耕 10 a 以后, 生物结皮盖度及组成基本达到一个相对稳定的状态<sup>[24]</sup>, 因此, 在每个研究点, 选取 3—5 个退耕撂荒 10 a 以上的样地, 兼顾阳坡、阴坡、梁峁顶、梁峁坡等不同的坡向、坡位, 坡度选择依据研究地点的典型坡度, 样地间距除个别受地形影响稍小外, 其余的均大于 500 m。每个样地上布设 4 个  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的样方, 调查生物结皮盖度、组成、维管束植物盖度、植物种类数、枯落物和裸土盖度。样方按“之”字形布设, 样方间距除个别因地形原因略小外, 其余均大于 20 m。每个  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  样方中, 按“品”字形或沿对角线布设 3 个  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  的样方调查植物斑块的个数和大小。各样点基本情况如表 1 所示。

### 1.2.2 调查指标及方法

样地环境信息: 调查并记录每个样地坡向、坡度、海拔、地貌部位等。

生物结皮盖度及组成调查: 于设定的  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的样方中用 25 点样方法(即样点截取法, 样框大小为  $25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ , 在样框的边上每 5 cm 向对边拉线, 共将样框分为 25 个  $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$  的正方形, 在每个正方形相同位置的顶点处, 用针状物垂直扎向地面, 记录落点处的地表物<sup>[25]</sup>)。重复 10 次, 调查生物结皮及其组分盖度, 同时测得枯落物盖度、植物茎基盖度以及裸土斑块盖度。

维管束植物调查: 采用  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的样方调查维管束植物(绝大部分为草本植物, 少量灌木)的种类、总盖度、每种草本植物的平均高度、盖度和多度。完成后, 在  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的样方中, 采用  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  样方调查维管束植物的株数(即斑块数), 采用椭圆相似法<sup>[26]</sup>(用一系列不同半径的圆片对照或用直尺测量植物茎基的半径, 所测量的半径均为区间值, 最小值设为 0.1 cm, 半径不足 0.1 cm 的按 0.1 cm 统计。)估算植物茎基(假设植物被贴近地表剪除后的剩余部分)的面积作为植物斑块面积。

表 1 样地基本情况  
Table 1 Characters of the sampling sites

样带 Sampling zone	降雨量/mm Rainfall	地点 Location	土壤类型 Soil type	植物群落 Plant communities	坡度/(°) Slope	坡向 Slope aspect
1	250—300	盐池县城北	风沙土	沙蒿 <i>Artemisia dosterorum</i>	<5	—
				胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	<5	—
				柠条 <i>Caragana arborescens</i>	<5	—
2	300—350	盐场堡乡	风沙土	苦豆 <i>Trigonella foenum-graecum</i>	<5	—
				沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	5	—
				胡枝子 <i>L. bicolor</i>	5	—
3	350—400	杨井镇	黄绵土	茵陈蒿 <i>A. capillaris</i>	7	—
				百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	10	西偏北
				长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	15	西
					20	东
4	400—450	铁边城-新寨	黄绵土		25	西
				百里香 <i>T. mongolicus</i>	<5	东偏北
				长芒草 <i>S. bungeana</i>	20	东偏北
				铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i>	25	东偏南
5	450—500	杨青合沟	黄绵土		30	北
				铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i>	5	南
				长芒草 <i>S. bungeana</i>	15	东偏北
				狭裂白蒿 <i>A. kanashiroi</i>	25	西
6	500—550	永宁镇	黄绵土		30	东
				白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	15	西
				长芒草 <i>S. bungeana</i>	20	西
				狭裂白蒿 <i>A. kanashiroi</i>	25	西

为了描述维管束植物与生物结皮的分布格局,参照景观生态学中斑块-廊道-基质模式,以生物结皮(将裸土认为是强烈扰动的生物结皮)为基质,以植物为斑块,参考景观生态学相关特征指数的定义,计算植物斑块的密度指数、数量破碎化指数、植物分离度指数等指标,计算植物斑块及其破碎化指标<sup>[27-29]</sup>方法如下:

(1) 斑块数 植物的株数或者丛数,即植物茎基个数(个)。

(2) 研究基底面积 研究基底面积设定为样地中调查的样方总面积,即每个样带选择样地后调查植物斑块特征所统计的 1 m × 1 m 小样方的总面积。对应于 1—6 样带依次为 48、36、48、48、48、48 m<sup>2</sup>。

(3) 植物斑块密度指数 植物斑块个数与其面积之比,比值越大,破碎化程度越高,公式为:

$$PD = \sum N_i / A$$

式中,  $PD$  为植物斑块密度指数,  $\sum N_i$  为研究区植物斑块总数或景观斑块类型的数目,  $A$  为研究区总面积或植物斑块的面积,  $PD$  值越大,表明破碎化程度越高。本文  $\sum N_i$  选取各降雨量带植物斑块总数,  $A$  选取研究基底面积。

(4) 景观斑块数量破碎化指数 指景观被分割的破碎程度,反映景观空间结构的复杂性。公式为:

$$FN_i = MPA \cdot (N_i - 1) / TA$$

式中,  $FN_i$  为第  $i$  类景观斑块类型的景观破碎度指数,  $MPA$  为整个景观的平均斑块面积,  $N_i$  为第  $i$  类景观斑块类型的斑块数目,  $TA$  为景观总面积。  $FN_i \in (0, 1)$ , 0 表示景观完全未被破坏, 1 表示景观被完全破坏。这里  $i$  的取值为 1, 只有植物斑块这一种类型,  $TA$  用研究基底面积代替。

(5) 景观分离度指数 分离度是指某一景观中不同斑块个体空间分布的离散(或集聚)程度。公式为:

<http://www.ecologica.cn>

$$N_i = \frac{A}{2A_i} \cdot \sqrt{\frac{n}{A}}$$

式中  $N_i$  为景观类型  $i$  的分离度指数  $A$  为研究区总面积  $A_i$  为景观类型  $i$  的面积,  $n$  为景观类型  $i$  的斑块数。这里  $i$  的取值为 1, 只有植物斑块这一种类型。分离度用来分析景观要素的空间分布特征, 分离度越大, 表示斑块越离散。斑块之间距离越大。

### 1.3 数据处理

数据处理和统计分析采用 Excel 2013 和 SPSS 18.0 软件, 对不同降雨量带生物结皮及组分盖度、植物斑块的茎基面积和斑块数分别进行正态分布检验与转换, 之后进行单因素方差分析, LSD 法进行多重比较, 显著性水平设定为  $P < 0.05$ 。对藻结皮和藓结皮盖度、生物结皮和维管束植物盖度分别进行相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄土高原不同降雨量带退耕地地表覆被

黄土高原不同降雨量带退耕地地表覆被如表 2 所示, 其中生物结皮、枯落物、维管束植物茎基、裸土均在地表表层, 构成整个地表的覆被, 呈连续式分布。维管束植物, 特别是其茎基, 以不连续的斑块式镶嵌于以生物结皮覆被为主的地表。维管束植物茎基盖度先增大后减小, 但均小于 20%。植物茎基本身多成圆形、散点式分布于地面, 为非连续体, 生物结皮盖度变化于 80.8%—55.1% 之间, 随降雨量的增加, 先减小后趋于稳定, 均大于 50%, 连续分布于地面, 枯落物盖度呈增大趋势, 与散点状分布的植物有很好的对应关系, 因此盖度虽然能达到 20% 以上, 但无法连接起来形成连续体。裸土盖度先减小后增大, 这与动物活动有关, 如蚁穴、动物足迹等, 即使盖度达到 10%, 其分布也是随机的、散点的。

表 2 样带地表覆被情况

Table 2 Characters of surface coverage of the sampling zones

样带 Sampling zone	植物茎基盖度 / % Coverage	生物结皮盖度 / % Biocrust coverage	枯落物盖度 / % Litter coverage	裸土盖度 / % Bare soil coverage
1	1.7 ± 0.4 c	74.7 ± 3.8 ab	11.7 ± 2.4 bc	11.9 ± 3.9 a
2	1.7 ± 0.8 c	80.8 ± 2.6 a	9.1 ± 3.1 c	8.4 ± 1.0 ab
3	9.5 ± 2.9 b	67.0 ± 3.5 bc	15.0 ± 2.4 abc	8.4 ± 0.4 ab
4	11.4 ± 1.9 ab	59.3 ± 5.8 c	23.8 ± 5.3 a	5.6 ± 1.0 b
5	16.8 ± 0.5 a	59.6 ± 1.6 c	20.1 ± 1.6 ab	3.4 ± 0.8 b
6	9.8 ± 3.3 b	55.1 ± 4.7 c	23.2 ± 3.1 a	12.0 ± 1.7 a

表中 a、b、c 字母表示差异显著性, 显著水平为  $P < 0.05$

### 2.2 黄土高原不同降雨量带生物结皮组成及分布特征

研究区生物结皮的盖度随降雨量增加而呈递减趋势(表 2), 以 350 mm 降雨量线为界, 分为两个等级, 样带 1 和 2 的生物结皮盖度平均为 77.8%, 样带 3—6 中盖度平均为 60.3%, 而在样带 1 和 2 与样带 3—6 内生物结皮盖度差异不显著, 这可能与样带 1 和 2 为风沙土, 样带 3—6 为黄绵土有关。

从图 1 可见, 随降雨量的变化, 不同类型生物结皮的盖度亦有所差异。藻结皮盖度在样带 1—6 中差异不显著。藓结皮盖度随着降雨量的增加及土壤质地由风沙土变为黄绵土先少量增加后减小, 样带 1 和 2 中藓结皮盖度显著大于样带 4—6, 样带 1 与样带 3 中藓结皮盖度差异不显著。地衣结皮的盖度整体很低, 但样带 5 中地衣结皮盖度显著高于其他样带。

图 1 为研究区藻结皮、藓结皮占生物结皮百分比的变化, 随降雨量及土壤质地的变化, 藻结皮所占生物结皮的百分比在样带 1 和 2 (风沙土, 较低的降雨量) 显著低于样带 6 (黄绵土, 高降雨量), 但与样带 3、4、5 (黄绵土, 较高降雨量) 无显著差异, 样带 6 与样带 3、4、5 无显著差异, 即在同为黄绵土的情况下, 降雨量的增加并没有显著改变生物结皮中藻结皮所占的百分比, 在降雨量为 250—500 mm 之间时, 土壤由风沙土变为黄绵土,

藻结皮所占的百分比未发生显著变化,说明在该降雨范围内,土壤质地并不决定生物结皮各组分的百分比;藓结皮所占生物结皮的百分比在样带 1、2 显著高于样带 6,与样带 3、4、5 无显著差异,样带 6 与样带 3、4、5 无显著差异,表现规律和藻结皮的相同。

对藻结皮和藓结皮进行相关性分析( $r = -0.749$ ,  $n = 22$ ) 结果表明研究区藻结皮和藓结皮盖度有显著的负相关关系,即二者之间存在此消彼长的关系。

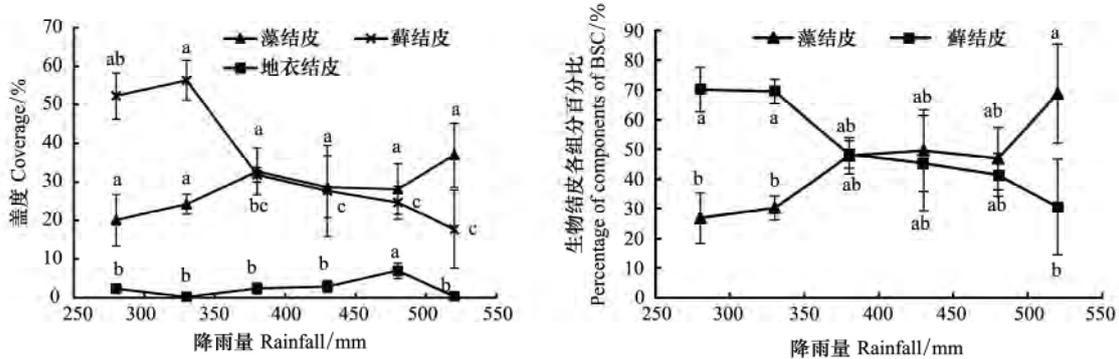


图 1 不同降雨量带生物结皮(生物结皮、藻结皮、藓结皮、地衣结皮)分布

Fig.1 Biological soil crust (cyanobacteria crust, moss crust, lichen crust) distribution in different rainfall zone

图中 a、b、c 字母表示差异显著性,显著水平为  $P < 0.05$

### 2.3 黄土高原不同降雨量带维管束植物群落特征

研究区各样带的维管束植物群落特征如表 3 所示。植物种类数(大样方中平均植物种类数)随着降雨量的增加呈现先增加后减少再增加再减少的波动状态。维管束植物盖度随着降雨量的增加先减小后增大,维管束植物冠层由散点状分布到连续分布,样带 4—6 中维管束植物盖度差异不显著,但显著高于样带 1—3,样带 2 中植被盖度最低,且与其余样带差异显著。植被高度随降雨量的增加呈波动变化,除样带 6 以白羊草为优势种的群落具有较高的植被高度外,其余降雨量带中的植被高度相差不大。

表 3 调查研究点的维管束植物基本特征

Table 3 Vascular plant characters of the research sites

样带 Sampling zone	植物种类数 Vascular plant species	维管束植物冠层盖度/% Vascular plant coverage	维管束植物高度/cm Vascular plant height
1	7.3 ± 0.6 c	27.0 ± 8.3 b	15
2	8.8 ± 0.4 ab	10.0 ± 1.0 c	10
3	8.7 ± 0.3 ab	28.8 ± 5.2 b	10
4	9.2 ± 0.3 a	45.3 ± 4.1 a	15
5	9.6 ± 0.2 a	44.8 ± 4.0 a	15
6	8.1 ± 0.3 bc	58.7 ± 3.2 a	60

植物种类数为 5 m × 5 m 样方中统计到的,植被高度为研究样带中所调查的所有植被高度的众数;表中 a、b、c 字母表示差异显著性,显著水平为  $P < 0.05$

### 2.4 维管束植物与生物结皮镶嵌分布特征

研究区维管束植物与生物结皮盖度随着降雨量带的变化具有明显的此消彼长的关系(图 2),维管束植物盖度变化范围为 10.0%—58.7%,生物结皮盖度为 55.1%—80.8%,维管束植物与生物结皮的盖度在样带 1—6 中具有显著的负相关关系( $r = -0.688$ ,  $n = 23$ ),说明维管束植物冠层盖度的增加,显著减缓了生物结皮的发育。两者的盖度(即双层覆被,地面上层即维管束植物冠层覆被,地面表层即生物结皮覆被,未除去重叠部分)之和,在样带 6 达到最大值 114%,在样带 2 中最小,为 91%。

研究区植物茎基面积的最小值均为 0.03 cm<sup>2</sup>;极差与降雨量间没有明显的相关性;平均值与降雨量间有

很好的一致性 随着降雨量的增加 植物平均茎基面积不断增大(表 4); 从众数可知, 研究区各降雨量带维管束植物均以半径不超过 0.1 cm 的细小植物占优势; 由中位数和较大四分位数变化趋势可看出 植物个体茎基面积随降雨量的增加而增加(图 3), 在样带 1—3 中处于一个很低的水平 降雨量大于 400 mm 时, 有很明显的增长趋势, 但植物斑块面积在样带 1—5 中差异不显著, 并显著低于样带 6。植物斑块数随着降雨量的增加先增加后减少, 样带 1、2 及样带 6 的植物斑块数显著低于样带 3—5(图 3)。对单位面积的植物斑块面积与斑块数做相关性分析( $r = -0.416^*$ ,  $n = 23$ ) 结果表明两者显著负相关。

表 4 维管束植物斑块茎基面积描述性统计

Table 4 Descriptive statistical parameters characteristic of vascular plant basal area

样带 Sampling zone	维管束植物茎基斑块面积 Vascular plant basal area/ cm <sup>2</sup>						
	最大值 Max	最小值 Min	极差 Range	平均值 Average	众数 Mode	中位数 Median	第三四分位数 Quartile 3
1	78.50	0.03	78.47	1.59	0.03	0.03	0.20
2	7.07	0.03	7.04	0.36	0.03	0.03	0.13
3	50.24	0.03	50.21	0.44	0.03	0.03	0.28
4	1017.36	0.03	1017.33	2.64	0.03	0.07	1.13
5	615.44	0.03	615.41	5.50	0.03	0.07	3.14
6	1661.06	0.03	1661.03	53.26	0.03	7.07	28.26

第三四分位数 (Q3), 又称“较大四分位数”, 等于该样本中所有数值由小到大排列后第 75% 的数字

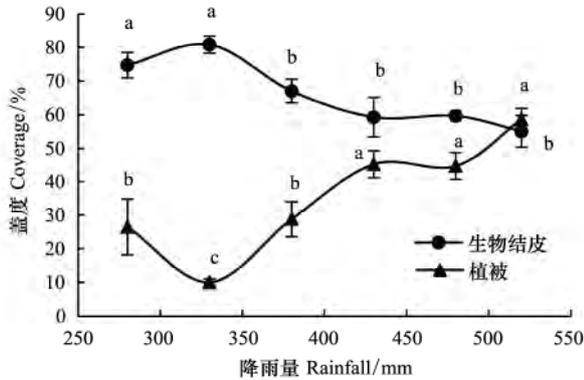


图 2 不同降雨量带生物结皮与植被盖度的变化

Fig. 2 Biocrust and vegetation coverage in different precipitation zone

图中 a、b、c 字母表示差异显著性, 显著水平为  $P < 0.05$

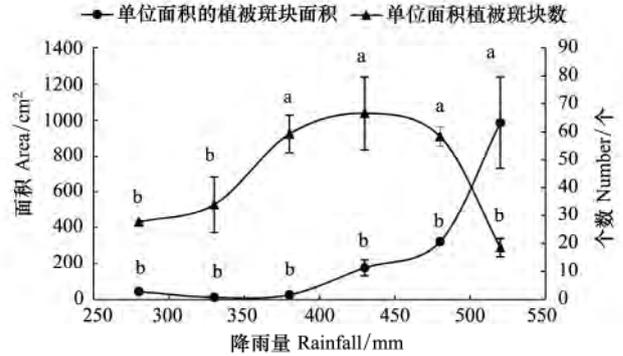


图 3 单位面积中植物斑块面积与斑块数随降雨量的变化

Fig. 3 Effect of rainfall gradients on area and the number of patches of vascular plant per unit square meter

图中 a、b、c 字母表示差异显著性, 显著水平为  $P < 0.05$

在景观生态学景观尺度和景观斑块尺度上, 破碎化指数主要反映嵌块分离程度, 除斑块数、斑块面积、平均斑块面积外, 还可用表 5 所示指数进行表示。

表 5 维管束植物茎基斑块的景观破碎化指数随降雨量的变化

Table 5 Patches of vascular plant basal landscape fragmentation index varies with rainfall

样带 Sampling zone	斑块密度指数 Patch density index	斑块数量破碎化指数 Patch number fragmentation	分离度指数 Splitting index
1	0.63	0.00	6.00
2	2.78	0.00	23.93
3	2.26	0.00	14.66
4	0.38	0.02	2.32
5	0.18	0.03	1.19
6	0.02	0.10	0.22

维管束植物的景观斑块密度指数在样带 2、3 中较大,表明该区植物斑块的破碎度大于其余样带,植物斑块的破碎度在样带 6 中最小;6 个样带的维管束植物景观数量破碎化指数均接近于 0,表明选择的样地均未遭到破坏或强烈干扰,呈现的是一种自然的状态;维管束植物的景观分离度指数随降雨量的增加呈明显减小趋势,说明降雨量的增加,使得植物斑块间的距离逐步减小,即维管束植物覆被越来越大。

### 3 讨论

#### (1) 黄土高原不同降雨量带退耕地维管束植物与生物结皮盖度

本研究结果表明,黄土高原不同降雨量带生物结皮盖度达 55.1%—80.8%,平均盖度为 66.0%。与以往达到 60%—70% 的研究结果相符<sup>[14]</sup>。生物结皮盖度在年降雨量 250—350 mm 地区与 350—550 mm 地区差异显著。在年降雨量为 250—350 mm 的地区,生物结皮盖度为 74.7%—80.8%,均值为 77.8%;在年降雨量 350—550 mm 的地区,生物结皮盖度为 55.1%—67.0%,均值为 60.3%。第 1、2 降雨量带的土壤类型为风沙土,降雨量较低,维管束植物稀疏,地表枯落物较少(表 2),为生物结皮发育提供了空间<sup>[30]</sup>。藻结皮的分布主要受坡向影响,其盖度在调查区差异不显著,藻结皮在生物结皮中所占的百分比随降雨量的增加有增加趋势,在年降雨量 250—350 mm 地区显著低于年降雨量 500—550 mm 地区,这种趋势并不与降雨量或土壤质地呈简单的正负相关关系;藓结皮盖度随着降雨量的增加先少量增加后减小,与生物结皮总盖度变化趋势一致,但在生物结皮组分中的百分比随降雨量的增加呈减小趋势,在年降雨量 250—350 mm 地区显著高于年降雨量 500—550 mm 地区,这可能与更好的水热条件带来的维管束植物更好的萌芽、发育、枯落物有关,使之减缓了生物结皮的演替<sup>[30]</sup>;地衣结皮的盖度整体很低。

研究区退耕地维管束植物恢复已有许多研究结果,如温仲明等<sup>[31]</sup>发现,黄土高原退耕地区的维管束植物自然演替经过 40—50a 的时间,分布较多的仍是长芒草、铁杆蒿、白羊草、大针茅和达乌里胡枝子等群落类型。许智超等<sup>[32]</sup>在研究吴起县退耕 10a 维管束植物恢复的变化时发现维管束植物盖度在 30%—45%、45%—60% 的面积比从最初的 0.75%、0.08% 增长到 10a 后的 48.01%、39.95%。本调查结果表明,在降雨量 500—550 mm 样带的主要植物种是白羊草、长芒草、狭裂白蒿,450—500 mm 的是铁杆蒿、长芒草、狭裂白蒿,400—450 mm 的是百里香、长芒草、铁杆蒿,350—400 mm 的是茵陈蒿、百里香、长芒草,300—350 mm 的是苦豆、沙蓬、胡枝子,250—300 mm 的是沙蒿、胡枝子、柠条。其中 250—300 mm 中的柠条为人工栽种。本研究在吴起县(年降雨量 400—450 mm、450—500 mm)的两个样地维管束植物盖度为 45.3% 和 44.8%,与前人的结果基本一致,说明调查所选样地典型,能代表当地的维管束植物状况。样带 1、2 为人工封禁地,但样带 2 中维管束植物盖度出现异常,可能是所选样地离高速公路较近,恢复时间短,尚未达到自然状态,样带 1 人工封禁已有 10a 以上,基本恢复至自然状态。

在这些地区,生物结皮是地表覆被物中盖度最大的组分。Forman<sup>[33]</sup>认为,景观生态学斑块-廊道-基底模式中,面积上的优势、空间上的高度连续性和对景观总体动态的支配作用这些结构和功能特征是识别基底的 3 个基本标准。显然,生物结皮满足面积上的优势和空间上的高度连续性两个标准,虽然生物结皮并未对景观总体动态起到支配作用,但就景观镶嵌体格局而言,可以认为生物结皮是被镶嵌体,单株植物则以大小不一的斑点状镶嵌在生物结皮上。

#### (2) 黄土高原不同降雨量带生物结皮与维管束植物镶嵌式分布格局

调查区域中,单位面积的植物斑块面积 12—985 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>,随着降雨量的增加而增加,单位面积的植物斑块个数 19—67 个,随着降雨量的增加先增加后减小。在年降雨量 250—300 mm 地区,土壤为风沙土,常见植物有沙蒿、胡枝子、柠条,单位面积的植物斑块面积和个数均处于较低,但不是 6 个样带的最小值,斑块密度指数与分离度指数均为 6 个样带中等水平,表明破碎化程度与植物斑块间距均适中。在年降雨量 300—350 mm 地区,土壤由风沙土向黄绵土转变,该区常见植物有苦豆、沙蓬、胡枝子,单位面积的植物斑块面积变化不显著,单位面积的维管束植物个数变化亦不显著,斑块密度指数与分离度指数增大,表明该区域植物斑块破碎度

增大、斑块间距增大,维管束植物较前一样带稀疏。随着降雨量的继续增加,在 350—400 mm 的地区,常见植物为茵陈蒿、百里香、长芒草,沙生植物消失,单位面积的植物斑块面积变化不显著,个数显著增加,斑块密度指数减小,表明破碎化程度减小,分离度指数亦减小,即植物斑块间距不断减小,维管束植物由稀疏向茂盛发展。在 400—450 mm 地区,常见植物为百里香、长芒草、铁杆蒿,单位面积的植物斑块面积和个数变化均不显著,但斑块密度指数大幅减小,表明破碎化程度大幅减小,分离度指数减小,植物斑块间距减小,维管束植物越来越茂盛。在年降雨量 450—500 mm 地区,单位面积的植物斑块面积和个数均变化不显著,斑块密度指数与分离度指数减小,表明该区域植物斑块破碎度减小、斑块间距减小。在年降雨量 500—550 mm 地区,单位面积的植物斑块面积显著增加,达到  $985 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ ,是 6 个样带的最大值,单位面积的植物斑块个数显著减小,低至 19 个,是 6 个样带的最小值,块密度指数与分离度指数均为 6 个样带中的最小值,表明其植物斑块破碎度、斑块间距均是最小的,这与该区优势种为白羊草有关。白羊草是禾本科孔颖草属植物,丛生、具匍匐茎的多年生暖季型牧草,属 C4 植物<sup>[34]</sup>,形成的植株个体巨大。因此,单位面积上的株数少,斑块的间距较小。

随降雨量增加,单个植物斑块的面积整体呈增大趋势(表 4),其中数量上占优势的始终是半径小于 0.1 cm 的植物,但第三四分位数的变化表明随着降雨量的增加,植物的个体在不断增大,这是因为常见植物的变化,从沙生植物沙蒿、沙蓬过渡到铁杆蒿、长芒草再过渡到 C4 植物白羊草,植物的本身决定了其株体的潜在大小,另外在常见植物相似的地区,如样带 3、4、5,降雨量的增多,地理位置的南移,使植物获得了更好的光温水条件,植物个体也就偏大一些。

### (3) 黄土高原不同降雨量带生物结皮与维管束植物的动态变化

在调查区,生物结皮与维管束植物共同存在,两者的盖度随降雨量的变化具有明显的“此消彼长”的现象。在年降雨量 250—300 mm、300—350 mm 地区,维管束植物稀疏,但生物结皮发育良好,以藓结皮为优势组分,藻结皮次之,地衣结皮最少。在年降雨量 350—400 mm 地区,维管束植物盖度显著提高,生物结皮盖度显著下降,维管束植物盖度依然小于生物结皮盖度,降雨量的增加及其他环境因素的改善,使维管束植物获得更好的发育条件,植物斑块数、斑块面积均有增加,因而维管束植物盖度增加,相应的生物结皮盖度就减少,由于植物生长及枯落物对地表的覆盖,藓结皮的盖度下降,藻结皮的盖度上升,两者达到基本相等的状态,表明生物结皮盖度与发育程度均受到了维管束植物的抑制。年降雨量 400—450 mm、450—500 mm 地区,生物结皮盖度与维管束植物盖度保持在相对的稳定状态,无显著变化,生物结皮各组分盖度也处于相对稳定状态,藻结皮盖度开始高于藓结皮盖度,表明该区降雨量并不是维管束植物与生物结皮发育的限制因子,即使有较大的降雨量年际变化,也不会造成自然荒坡维管束植物格局的显著变化。在年降雨量 500—550 mm 地区,出现了维管束植物盖度高于生物结皮盖度的情况,且藻结皮盖度明显高于藓结皮盖度,表明降雨量的进一步增加,使维管束植物获得更好的发育条件,维管束植物更好发育限制了生物结皮的发育,盖度变小,发育程度降低。随着降雨量的继续增加,光热条件更好,维管束植物的盖度会进一步增大,生物结皮的盖度会进一步降低,到一定程度后,生物结皮可能会从地表消失或维持在一个很低的水平上。

## 4 小结

(1) 在黄土高原降雨量 250—550 mm 地区退耕地及自然荒坡上,维管束植物与生物结皮共同存在,呈镶嵌分布,生物结皮可视为被镶嵌体,植物为镶嵌体。维管束植物与生物结皮的盖度在 250—550 mm 降雨量带中具有显著的负相关关系。

(2) 黄土高原不同降雨量带生物结皮盖度差异显著,250—350 mm 降雨量带生物结皮盖度显著高于 350—500 mm 降雨量,盖度均值为 66.0%。不同降雨量带生物结皮各组分盖度差异不显著。

(3) 黄土高原地区不同降雨量带维管束冠层盖度变化于 10.0%—58.7%,随降雨量的增加而增加,一定程度上限制了生物结皮的发育和演替,两者表现出了“此消彼长”的关系。随着降雨量的增加植物种类数呈波动状态,除 500—550 mm 降雨量带中以白羊草为优势种的群落具有较高的维管束植物高度外,其余降雨量

带下维管束植物高度相差不大。

(4) 植物斑块的破碎度随降雨量增加而降低,在降雨量 300—400 mm 样带最大,在降雨量 500—550 mm 样带最小,维管束植物的景观分离度指数随降雨量的增加明显减小。

致谢:感谢 Matthew Alan Bowker 博士对英文摘要的润色。

#### 参考文献(References):

- [1] 朱显谟. 黄土地区植被因素对于水土流失的影响. 土壤学报, 1960, 8(2): 110-121.
- [2] 唐克丽. 中国水土保持. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] 张光辉, 梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述. 水土保持研究, 1996, 3(2): 104-110.
- [4] 王晗生, 刘国彬. 植被结构及其防止土壤侵蚀作用分析. 干旱区资源与环境, 1999, 13(2): 62-68.
- [5] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 植被保持水土有效性研究进展. 水土保持研究, 2002, 9(1): 76-80.
- [6] Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981—2006): Impacts of climate changes and human activities. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(1): 67-78.
- [7] 王光谦, 张长春, 刘家宏, 魏加华, 薛海, 李铁键. 黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析. 泥沙研究, 2006, (2): 10-16.
- [8] 周洪建, 王静爱, 岳耀杰, 李睿. 人类活动对植被退化/恢复影响的空间格局——以陕西省为例. 生态学报, 2009, 29(9): 4847-4856.
- [9] 汪有科, 吴钦孝, 赵鸿雁, 刘向东, 韩冰. 林地枯落物抗冲机理研究. 水土保持学报, 1993, 7(1): 75-80.
- [10] 查轩, 唐克丽, 张科利, 白红英, 蒋集华. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究. 水土保持学报, 1992, 6(2): 52-59.
- [11] Neil E West. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions. Advances in Ecological Research, 1990, 20: 179-223.
- [12] Eldridge D J, Greene R S B. Microbiotic soil crusts - A review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. Australian Journal of Soil Research, 1994, 32(3): 389-415.
- [13] Jayne Belnap, Otto L Lange. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Germany, Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [14] Zhao Y G, Xu M X. Runoff and soil loss from revegetated grasslands in the hilly loess plateau region, china: influence of biocrust patches and plant canopies. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(4): 387-393.
- [15] 秦伟, 朱清科, 张宇清, 赵磊磊. 陕北黄土区生态修复过程中植物群落物种多样性变化. 应用生态学报, 2009, 20(2): 403-409.
- [16] 刘宝军, 赵晓光, 党小虎, 王国梁, 袁子成. 陕北黄土丘陵区退耕地植物群落演替特征. 中国水土保持科学, 2012, 10(5): 77-83.
- [17] 勃海锋, 刘国彬, 王国梁. 黄土丘陵区退耕地植被恢复过程中土壤入渗特征的变化. 水土保持通报, 2007, 27(3): 1-6.
- [18] 王国梁, 刘国彬, 刘芳, 侯喜禄, 周生路. 黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化. 生态学报, 2003, 23(12): 2550-2557.
- [19] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 张国秀. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响. 应用生态学报, 2013, 24(1): 105-112.
- [20] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 张国秀, 杨凯. 黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1316-1326.
- [21] 王翠萍, 廖超英, 孙长忠, 田小雄, 吕建亮. 黄土地表生物结皮对土壤贮水性能及水分入渗特征的影响. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 54-59, 64-64.
- [22] 中国国际工程咨询公司. 退耕还林工程中期评估报告. 2003.
- [23] 刘引鸽. 陕北黄土高原降水的变化趋势分析. 干旱区研究, 2007, 24(1): 49-55.
- [24] 赵允格, 许明祥, 王全九, 邵明安. 黄土丘陵区退耕地生物结皮理化性状初报. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1429-1434.
- [25] Jayne Belnap, Julie Hilty Kaltenecker, Roger Rosentreter, John Williams, Steve Leonard, David Eldridge. Biological soil crusts: Ecology and management. USDI, Technical Reference 1730-2, 2001: 81-82.
- [26] Thalen D C P. Ecology and Utilization of Desert Shrub Rangelands in Iraq. Hague: Dr W Junk BV Publishers, 1979.
- [27] 邬建国. 景观生态学格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000: 99-119.
- [28] 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. 生态学报, 1997, 17(5): 453-461.
- [29] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001: 202-207.
- [30] 张健, 刘国彬, 许明祥, 薛蓬, 刘江华. 黄土丘陵区影响生物结皮退化因素的初步研究. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 14-20.
- [31] 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.
- [32] 许智超, 张岩, 刘宪春, 朱清科. 半干旱黄土区退耕还林十年植被恢复变化分析——以陕西吴起县为例. 生态环境学报, 2011, 20(1): 91-96.
- [33] Richard T T Forman. Some general principles of landscape and regional ecology. Landscape Ecology, 1995, 10(3): 133-142.
- [34] 董宽虎. 山西白羊草草地生产性能、种群生态位及草地培育的研究. 北京: 中国农业大学, 2004.