

DOI: 10.5846/stxb201403180471

李文娇, 刘红梅, 赵建宁, 修伟明, 张贵龙, 皇甫超河, 杨殿林. 氮素和水分添加对贝加尔针茅草原植物多样性及生物量的影响. 生态学报, 2015, 35(19): - .

Li W J, Liu H M, Zhao J N, Xiu W M, Zhang G L, Huangfu C H, Yang D L. Effects of Nitrogen and Water Addition on Plant Species Diversity and Biomass of Common Species in the *Stipa baicalensis* Steppe, Inner Mongolia, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): - .

氮素和水分添加对贝加尔针茅草原植物多样性及生物量的影响

李文娇^{1,2,3}, 刘红梅^{2,3}, 赵建宁^{2,3}, 修伟明^{2,3}, 张贵龙^{2,3}, 皇甫超河^{2,3}, 杨殿林^{1,2,3,*}

1 沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110866

2 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191

3 农业部产地环境质量重点实验室, 天津 300191

摘要: 为了解草原植物群落物种多样性和植物地上生物量对氮沉降增加和降水变化的响应, 在内蒙古贝加尔针茅 (*Stipa baicalensis*) 草原, 分别设置对照 (N0)、1.5 g/m² (N15)、3.0 g/m² (N30)、5.0 g/m² (N50)、10.0 g/m² (N100)、15.0 g/m² (N150)、20.0 g/m² (N200) 和 30.0 g/m² (N300) (不包括大气沉降的氮量) 8 个氮素 (NH₄NO₃) 添加梯度和模拟夏季增加降水 100 毫米的水分添加交互试验, 研究氮素和水分添加对草原群落植物物种多样性和几种常见植物地上生物量的影响。结果表明: (1) 氮素和水分的添加降低了草原群落植物物种多样性, 且氮素和水分有显著的互作效应。在水分添加的条件下, 随着施氮水平的增加, 群落植物物种多样性减小; 在无水分添加的条件下, 随着施氮水平的增加, 群落植物物种多样性呈先增加后减小的“单峰”变化趋势。(2) 不同植物对氮素和水分添加的响应不同, 随着施氮水平的增加, 羊草地上生物量显著增加; 贝加尔针茅、羽茅、糙隐子草、寸草苔和冷蒿先增加后减少, 呈单峰曲线; 星毛委陵菜、牧马豆、扁蓿豆和线叶菊地上生物量则逐渐减少。而且氮素和水分对贝加尔针茅、羽茅、扁蓿豆地上生物量有显著的交互作用。

关键词: 氮素添加; 水分添加; 植物多样性; 地上生物量; 贝加尔针茅草原

Effects of Nitrogen and Water Addition on Plant Species Diversity and Biomass of Common Species in the *Stipa baicalensis* Steppe, Inner Mongolia, China

LI Wenjiao^{1,2,3}, LIU Hongmei^{2,3}, ZHAO Jianning^{2,3}, XIU Weimin^{2,3}, ZHANG Guilong^{2,3}, HUANGFU Chaohe^{2,3}, YANG Dianlin^{1,2,3,*}

1 Department of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2 Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China

3 Key Laboratory of Original Agro-environment Quality of Ministry of Agriculture and Tianjin Key Laboratory of Agro-environment and Safe-product, Tianjin 300191, China

Abstract: Increases in atmospheric nitrogen deposition and changes in precipitation patterns are important phenomena related to changes in the global environment. These changes have created a series of increasingly serious ecological problems affecting the structure and function of grassland ecosystems. Therefore, grasslands have become a focus of ecological research in China and around the world in recent years. High nitrogen deposition can acidify grassland soils and lead to

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31170435); “十二五”国家科技计划项目 (2012BAD13B07); 农业科技成果转化资金项目 (2013GB23260579)

收稿日期: 2014-03-18; 网络出版日期: 2014-10-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangdianlin@caas.cn

nutritional imbalances, decreases in biodiversity and productivity, and grassland degradation, all of which are serious threats to the function of grassland ecosystems. Precipitation can increase the efficiency of nitrogen fertilizer used by plants, and climate warming is accompanied by changes in precipitation. Studies of the interactive effects of nitrogen deposition and variation in rainfall on natural grassland ecosystems can help to increase our understanding of the responses of such ecosystems to changes in the global climate. In China, the *Stipa baicalensis* steppe, a type of meadow steppe, is mainly distributed in the forest steppe zone of the Songliao Plain and the east Inner Mongolian Plateau. In Inner Mongolia, farmers mainly use *S. baicalensis* steppe as natural pasture; therefore, it has an important role in livestock production. The aim of this study was to evaluate the responses of grassland plant community species diversity and the aboveground biomass of several common plant species to nitrogen deposition and irrigation.

We set up a factorial experiment to test the interactive effects of eight nitrogen treatments and water addition in *S. baicalensis* steppe in Inner Mongolia in June 2010. This involved nitrogen (NH_4NO_3) application levels of 0 (the control treatment, CK), 15, 30, 50, 100, 150, 200, 300 $\text{kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (referred to as N0, N15, N30, N50, N100, N150, N200, N300, respectively) and simulated 100 mm summer rainfall. In mid-August 2013, we established 96 1 m $\times$ 1 m sample plots. The vegetation was harvested from each plot and the biomass of each species was measured to determine the effects of nitrogen and water addition on species diversity and the aboveground biomass of several common plants.

Nitrogen and water application reduced plant species diversity in the steppe community, and there was a significant interaction effect between nitrogen and moisture. When water was added, increasing nitrogen application levels resulted in decreases in plant species richness, Shannon-Wiener index, and Pielou evenness index. When water was not added, increasing nitrogen application levels resulted in changes in species richness, Shannon-Wiener index, and Pielou evenness index that showed a “single-peak”, but overall downward trend. Plant species differed in their responses to nitrogen and water addition. With increasing nitrogen application levels, the aboveground biomass of *Leymus chinensis* increased significantly, reaching a maximum at N300; the aboveground biomass of *S. baicalensis*, *Achnatherum sibiricum*, *Cleistogenes squarrosa*, *Carex duriuscula*, and *Artemisia frigida* first increased and then decreased, showing a “single-peak” trend; and the aboveground biomass of *Potentilla acaulis*, *Thermopsis lanceolata*, *Melilotoides ruthenica*, and *Filifolium sibiricum* decreased gradually. There was a significant interaction effect between water and nitrogen application level on the biomass of *S. baicalensis*, *A. sibiricum*, and *M. ruthenica*. We concluded that the changes in plant species diversity and aboveground biomass were related to nutrient application levels, water availability, their own characteristics, and interspecific and intraspecific competition.

Key Words: Nitrogen addition; Water addition; Plant diversity; Aboveground biomass; *Stipa baicalensis* steppe

大气氮沉降增加和降水格局变化作为全球环境变化的重要现象之一,其所带来的一系列生态问题日趋严重,影响草地生态系统结构和功能,并潜在地影响到大尺度上的元素循环,成为近年来国内外生态学家关注的热点和焦点之一^[1-2]。高氮沉降会导致草原土壤酸化、营养失衡、生物多样性减少、生产力降低、草地退化等,严重威胁到草原生态系统功能^[3]。气候变暖与降水变化总是相伴而生,降水增加有助于氮肥肥效的发挥。研究大气氮沉降增加和降水格局变化及其复合作用对草原生态系统的影响,有助于更深入地了解天然草原生态系统对全球变化的响应。对于制定科学的草地生态系统管理对策,实现天然草地的可持续发展具有重要的理论和实践意义。

在国际上,氮沉降对生物多样性影响的研究最早可以追溯到 20 世纪 70 年代,那时欧洲、北美的生态学家在温带森林开展氮沉降对森林生态系统结构和功能影响的研究,并于 90 年代形成了研究网络,如 NITREX 和 EXMAN 项目^[4]、美国 Harvard Forest 森林实验^[5]、the Adirondack Manipulation and Modeling Project (AMMP) 项目^[6]等。联合国环境规划署生物多样性委员会 (UNEP National Committees of diversities) 也把氮沉降列为评估

生物多样性变化的一个重要指标^[7]。在我国,自 1987 年开始开展了包括 9 个监测基地的农田长期土壤肥力和肥料效益监测试验^[8],2002 年在鼎湖山森林生态系统建立了系统研究氮沉降的永久样地^[9],2007 年在华西雨屏区慈竹林生态系统建立了氮沉降模拟控制试验^[10]。但到目前为止,我国关于氮输入和降水变化对草原生态系统的影响研究仅在典型草原、荒漠草原、高寒草原有报道^[11-14]。

贝加尔针茅草原是亚洲中部草原区所特有的草原群系,是草甸草原的代表类型之一。在我国主要分布在松辽平原、蒙古高原东部的森林草原地带。贝加尔针茅草原主要为天然牧场,在畜牧业生产中占有重要的地位。本文通过研究氮素和水分添加对贝加尔针茅草原植物群落物种多样性的影响,阐明不同水平氮素和水分添加条件下植物群落物种多样性和常见植物地上生物量的变化规律,为全面分析和评估全球变化对草原生态系统的影响,为草地的合理利用、生物多样性保护和退化草地恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区域位于大兴安岭西麓,内蒙古自治区鄂温克族自治旗伊敏苏木境内(48°27'—48°35'N,119°35'—119°41'E),海拔高度为 760—770 m,年均气温-1.6℃,年降水量 328.7 mm,年蒸发量 1478.8 mm,≥0℃年积温 2567.5℃,年均风速 4 m/s,无霜期 113 d。地势平坦,属于温带草甸草原区。半干旱大陆性季风气候。土壤类型为暗栗钙土^[15]。植被类型为贝加尔针茅草甸草原,建群种贝加尔针茅在群落中占绝对优势,羊草(*Leymus chinensis*)为优势种,变蒿(*Artemisia commutata*)、寸草苔(*Carex duriuscula*)、日荫菅(*Carex pediformis*)、扁蓿豆(*Pocockia ruthenica*)、祁洲漏芦(*Rhaponticu uniflorum*)、草地麻花头(*Serratula yamatsutanna*)、肾叶唐松草(*Thaictum petaloideum*)、多茎野豌豆(*Viciamul ticaulis*)等为常见伴生种。共有植物 66 种,分属 21 科 49 属。

1.2 试验样地设置与植被取样

于 2010 年 6 月在围栏样地内设置长期施肥和水分添加试验,试验采用裂区设计,主区为水分处理,副区为施氮素水平。氮处理设 8 个水平依次为:对照(N0),1.5 g N/m²(N15)、3.0 g N/m²(N30)、5.0 g N/m²(N50)、10.0 g N/m²(N100)和 15.0 g N/m²(N150)、20.0 g N/m²(N200)、30.0 g N/m²(N300),分 2 次施入,第 1 次 6 月 15 日施氮 50%处理水平;第 2 次 7 月 15 日施氮 50%处理水平,氮素为 NH₄NO₃。为能够尽可能均匀施肥,根据氮处理水平,将每个小区每次所需要施加的硝酸铵(NH₄NO₃)溶解在 8 L 水中(全年增加的水量相当于新增降水 1.0 mm),水溶后均匀喷施到小区内。CK 小区同时喷洒相同量的水。水分设置 2 个处理,分别为无水分添加、模拟夏季增雨 100 mm,模拟增雨的时间自 6 月 15 日始,每 7 天模拟增雨 10 mm,共 10 次。共 16 个处理小区,6 次重复,小区面积 8 m×8 m。

野外调查工作于 2013 年 8 月中旬进行。在各个处理小区内侧预留 1 m 的缓冲带,布设 1.0 m×1.0 m 观测样方,记录样方内各植物种的生物生态学特性。用收获法齐地面分种剪下后带回实验室,在 65℃下烘干 24 h 并称其重,测量草群地上生物量。共 16 个处理小区,6 次重复。

1.3 数据统计与分析

常见植物生产力用地上生物量(干重)表示;

植物群落物种多样性用以下三个指标来分析:

(1)物种丰富度用单位面积的物种数(S)来表示;

(2)Shannon-Wiener 指数(H');

$$H' = - \sum P_i \ln P_i$$

式中, P_i 是样方内每个物种的相对生物量

(3)均匀度指数采用 Pielou 指数(E);

$$E = H' / \ln(S)$$

式中,S为物种数

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 软件 (SPSS16.0) 进行数据处理分析、制图。在方差分析中,用邓肯多重比较 (Duncan's multiple range test) 检验有差异的变量间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 氮素和水分添加对草原植物群落物种多样性的影响

植物物种多样性是草原群落的主要特征。氮素与水分添加对贝加尔针茅草原植物群落物种丰富度、Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数均产生了影响。在水分添加的条件下,随着氮素添加水平的增加,物种丰富度、Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数均呈显著 ($P<0.05$) 下降的趋势;在 N30 氮素添加水平时,物种丰富度和 Shannon-Weiner 指数显著 ($P<0.05$) 低于对照;在 N100 氮素添加水平时,Pielou 均匀度指数显著 ($P<0.05$) 低于对照。在无水分添加的条件下,随着氮素添加水平的增加,物种丰富度、Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数均呈现先增加后减小的“单峰”趋势;物种丰富度在 N15 时达到高峰,在 N150 及以上氮素添加水平时,物种丰富度均低于对照,但差异不显著 ($P>0.05$);Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数在 N30 处达到高峰,与对照相比差异均不显著 ($P>0.05$),在 N150 氮素添加水平时,Shannon-Weiner 指数显著 ($P<0.05$) 低于对照;在 N100 氮素添加水平时,Pielou 均匀度指数显著 ($P<0.05$) 低于对照 (表 1)。单一水分添加条件下,植物群落物种丰富度、Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数均大于无水分添加条件下的相应指数,表明在无氮素添加的条件下,水分的添加可以增加草原植物群落的物种多样性;在 N30 及以上氮素添加水平时,水分添加条件下的物种丰富度小于无水分添加条件下的物种丰富度;在 N15 及以上氮素添加水平时,水分添加条件下的 Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数小于无水分添加条件下的相应指数,表明在氮素添加的条件下,水分的添加加速了草原植物群落的物种多样性的下降。

双因素方差分析也表明 (表 2),水分添加对贝加尔针茅草原植物群落物种丰富度的影响不显著 ($P>0.05$),对 Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数均有显著影响 ($P<0.05$);氮素添加对贝加尔针茅草原植物群落物种丰富度、Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数均有显著影响 ($P<0.05$);而且氮素和水分的添加对植物群落物种丰富度、Shannon-Weiner 指数存在显著 ($P<0.05$) 的交互作用,对 Pielou 均匀度指数的交互作用不显著 ($P>0.05$)。表明氮素与水分的交互作用会加快物种丰富度、Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数的下降,即氮素与水分的交互作用会使植物群落物种多样性下降的更迅速。

表 1 不同氮素添加水平对草原植物群落物种多样性的影响 (平均值 $\pm$ 标准误差)

Table 1 The influence of different nitrogen application levels to species diversity of the plant community (mean $\pm$ SE)

项目 Items	处理 Treatment	N0	N15	N30	N50	N100	N150	N200	N300
物种丰富度 Species richness	A	26 $\pm$ 1.39a	25 $\pm$ 1.32a	21 $\pm$ 1.48b	20.67 $\pm$ 1.09b	20 $\pm$ 1.59bc	18.33 $\pm$ 1.09bc	17.83 $\pm$ 1.58bc	16.17 $\pm$ 0.83c
Shannon-Weiner 指数 Shannon-Weiner index	N	19.67 $\pm$ 1.52a	22 $\pm$ 0.86a	21.67 $\pm$ 0.80a	21.5 $\pm$ 0.99a	21.17 $\pm$ 0.98a	19 $\pm$ 1.32a	18.83 $\pm$ 1.87a	18.33 $\pm$ 0.92a
Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	A	2.50 $\pm$ 0.09a	2.36 $\pm$ 0.16ab	2.08 $\pm$ 0.12bc	2.04 $\pm$ 0.06c	1.74 $\pm$ 0.09d	1.58 $\pm$ 0.07d	1.56 $\pm$ 0.07d	1.17 $\pm$ 0.12e
	N	2.25 $\pm$ 0.08ab	2.388 $\pm$ 0.07a	2.39 $\pm$ 0.03a	2.13 $\pm$ 0.07abc	2.00 $\pm$ 0.07bc	1.90 $\pm$ 0.08cd	1.83 $\pm$ 0.09cd	1.68 $\pm$ 0.21d

A: 水分添加;N: 无水分添加;同一行不同字母表示不同施氮水平条件间差异显著 ($P<0.05$)

表 2 氮素和水分添加对草原植物群落物种多样性影响的方差分析结果

Table 2 ANOVA results of the influence of nitrogen and water additions to species diversity of the plant community

因素 Factor	物种丰富度 Species richness	Shannon-Weiner 指数 Shannon-Weiner index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index
水分添加 Water addition	0.577	0.000	0.000
氮素添加 Nitrogen addition	0.000	0.000	0.000
水分 $\times$ 氮素 Water $\times$ Nitrogen	0.021	0.016	0.150

2.2 氮素和水分添加对草原群落常见植物地上生物量的影响

贝加尔针茅、羊草、羽茅、糙隐子草、牧马豆、扁蓿豆、草地麻花头、冷蒿、线叶菊、寸草苔、星毛委陵菜 11 个常见种,它们的地上生物量总和占草原植物群落总地上生物量的 77.80%—99.63%。结果表明,氮素和水分的添加可以显著增加草原优势植物的地上生物量($P<0.05$) (图 1),与对照相比,不同氮素添加水平均促进羊草种群地上生物量的增加,在水分添加的条件下,随着氮素添加水平的增加呈显著的增加趋势($P<0.05$),其中 N100 氮素添加水平时,羊草种群地上生物量显著($P<0.05$)高于对照,生物量达到 132.80 g/m^2 ,在 N300 添加水平时,羊草种群地上生物量最大,为 271.74 g/m^2 ,显著($P<0.05$)高于 N100 时;在无水分添加的条件下,羊草种群地上生物量随着氮素添加水平的增加也呈显著增加的趋势($P<0.05$),氮素添加水平为 N200 时,显著高于对照($P<0.05$),生物量为 209.70 g/m^2 ,但是与 N300 时差异不显著($P>0.05$)。贝加尔针茅种群地上生物量随着氮素添加水平的增加呈先增加后减少的“单峰”趋势,在水分添加的条件下,氮素添加水平在 N150 时,其地上生物量显著高于对照($P<0.05$),但在 N200 时达到高峰,为 248.11 g/m^2 ,比对照增加了 213.82 g/m^2 ,在 N300 时有所下降,但还是显著高于对照($P<0.05$),与 N200 时差异不显著($P>0.05$);

无水分添加的条件下,贝加尔针茅种群地上生物量在 N100 时显著高于对照($P<0.05$),在 N150 时达到最大,为 169.38 g/m^2 ,与对照相比增加了 145.22 g/m^2 ,氮素添加水平超过 N150 后,显著($P<0.05$)下降,N300 时与 N150 时相比,减少了 95.12 g/m^2 。与贝加尔针茅种群相似,羽茅、糙隐子草、寸草苔种群地上生物量随着氮素添加水平的增加也呈现先增加后减少的趋势,但是氮素的添加对糙隐子草的影响不显著($P>0.05$);水分添加的条件下,氮素的添加对寸草苔地上生物量的影响也不显著($P>0.05$)。牧马豆、扁蓿豆和线叶菊种群地上生物量均随着氮素添加水平的增加呈下降趋势,但是在无水分添加的条件下,扁蓿豆和线叶菊种群的地上生物量在不同氮素添加水平下差异不显著($P>0.05$),说明水分的添加促进了这几种植物对氮素的利用,使其地上生物量显著下降。草地麻花头的地上生物量在水分添加的条件下,随着氮素添加水平的增加呈现下降的趋势,但是差异不显著($P>0.05$);在无水分添加的条件下,氮素添加水平在 N0—N100 范围内,草地麻花头的地上生物量随着氮素添加水平的增加显著增加($P<0.05$),在 N100 时达到高峰,显著高于对照($P<0.05$),超过这个氮素添加水平后,随着氮素添加水平的增加呈下降趋势,氮素添加水平在 N300 时,草地麻花头的地上生物量仍高于对照 4.99 g/m^2 ,但是差异不显著($P>0.05$)。冷蒿的地上生物量在水分添加的条件下,N50 氮素添加水平时达到高峰,显著高于对照($P<0.05$),超过这个氮素添加水平后,显著下降($P<0.05$),氮素添加水平在 N200 时低于对照;在无水分添加的条件下,氮素的添加对冷蒿的地上生物量影响不显著($P>0.05$),在 N100 时达到高峰,N300 时冷蒿的地上生物量低于对照。随着氮素添加水平的增加,星毛委陵菜的地上生物量显著减少($P<0.05$),在水分添加的条件下,N30 时星毛委陵菜的地上生物量显著低于对照($P<0.05$),无水分添加的条件下,N15 时显著低于对照($P<0.05$);而且水分添加时冷蒿和星毛委陵菜的地上生物量也明显小于无水分添加时(图 1)。

双因素方差分析表明(表 3),水分的添加对贝加尔针茅、羽茅、糙隐子草、冷蒿和星毛委陵菜的地上生物量具有显著的影响($P<0.05$);氮素的添加对羊草、贝加尔针茅、羽茅、牧马豆、扁蓿豆、线叶菊和星毛委陵菜的地上生物量具有显著的影响($P<0.05$);氮素和水分对贝加尔针茅、羽茅、扁蓿豆的地上生物量具有显著的交互作用($P<0.05$)。总体看来,不同植物对不同氮素添加水平和水分添加的响应不同,使得群落结构发生变化不同。

表 3 氮素和水分添加对草原群落常见植物地上生物量影响的方差分析结果

Table 3 ANOVA results of the influence of nitrogen and water additions to aboveground biomass of the common species

因素 Factor	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)	(I)	(J)	(K)
水分添加 Water addition	0.184	0.003	0.000	0.000	0.131	0.183	0.404	0.000	0.079	0.738	0.003
氮素添加 Nitrogen addition	0.000	0.000	0.000	0.075	0.000	0.000	0.923	0.074	0.005	0.103	0.000
水分×氮素 Water×Nitrogen	0.393	0.027	0.000	0.781	0.919	0.005	0.105	0.760	0.758	0.742	0.078

(A) 羊草; (B) 贝加尔针茅; (C) 羽茅; (D) 糙隐子草; (E) 牧马豆; (F) 扁蓿豆; (G) 草地麻花头; (H) 冷蒿; (I) 线叶菊; (J) 寸草苔; (K) 星毛委陵菜

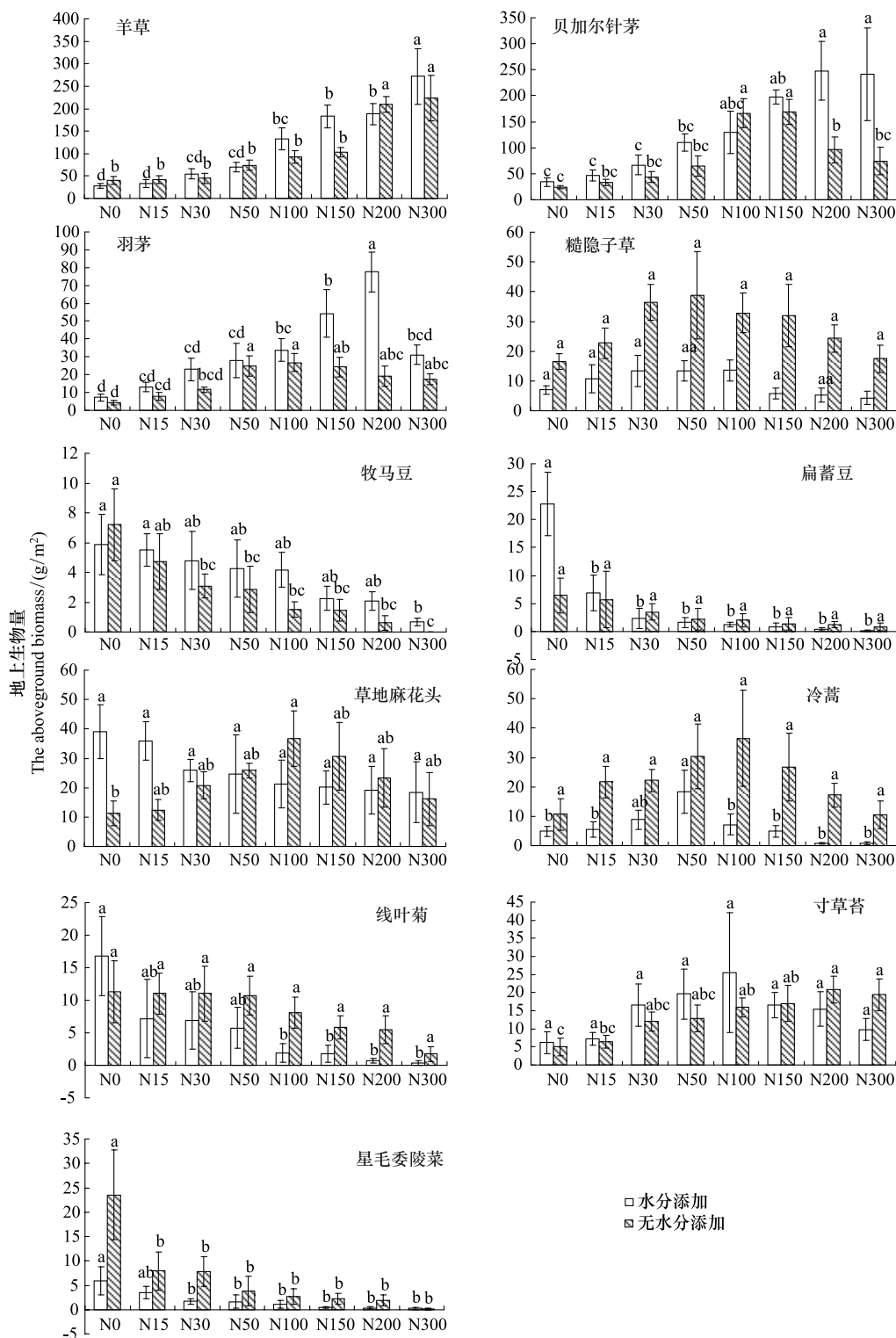


图1 不同氮素添加水平对草原群落常见植物地上生物量的影响(平均值±标准误差)

Table 1 The influence of different nitrogen application levels to aboveground biomass of the common species (mean±SE)

不同字母表示不同施氮水平条件间差异显著($P < 0.05$)。(A)羊草;(B)贝加尔针茅;(C)羽茅;(D)糙隐子草;(E)牧马豆;(F)扁蓿豆;(G)草地麻花头;(H)冷蒿;(I)线叶菊;(J)寸草苔;(K)星毛委陵菜

3 讨论

3.1 草原植物群落物种多样性对氮素和水分添加的响应

多样性是草原群落的重要特征,任何一种干扰因子对群落结构影响的研究都离不开植物多样性的问题^[16]。植物多样性是对一个群落内物种分布的均匀程度和数量的测量指标,是各个物种对资源的利用能力和对生境条件适应能力的体现^[17],是群落内各个物种生长动态的综合体现,而且群落植物多样性也与植物生长发育的环境因子有一定的关系^[18]。施肥是调节草地植物群落特征变化的有效途径,施肥增加了土壤中的有效资源,提高了土壤肥力,改变了植物地上与地下的竞争强度,进而引起植物群落结构的变化^[19]。关于施肥对植物群落组成的影响,已有相关研究开展了,多数研究认为施肥会导致群落植物物种多样性下降^[20-21],也有一些研究表明施肥对植物物种多样性无显著影响^[22-23],但也有学者认为施肥增加了植物物种多样性^[24-25]。本研究结果显示,在水分添加的条件下,氮素的添加会使贝加尔针茅草原群落植物的物种丰富度减少,Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数显著下降,与第一种施肥会导致群落植物物种多样性下降的观点相一致;在无水分添加的条件下,氮素对群落植物物种丰富度的影响不显著,与 Suding, Fan 等观点不一致^[26-27],但是随着施氮水平的增加,物种丰富度呈先增加后减少的“单峰”趋势,在 N15 达到高峰;Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数随着施氮水平的增加也先增加,在 N30 达到高峰,但是差异不显著,随后显著下降。分析出现不同结果的原因,群落植物物种丰富度和多样性指数的变化除与植被本身特性有关外,还可能受草原土壤基质的改善程度、种间与种内的竞争的影响^{[11][28]}。随着氮素添加水平的增加,多样性的增加可能导致种间及种内竞争程度的改变,尤其是喜氮植物羊草和贝加尔针茅在群落中的竞争优势越来越大,可能反过来抑制群落植物物种多样性的增加,导致更多的物种被排除,从而导致物种多样性的下降。在不添加氮素的条件下,水分添加与无水分添加的情况相比,物种丰富度、Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数有所增加,说明水分的添加有助于物种多样性的增加,这与白春利^[29]的研究结果相似,水分的添加显著增加了群落的丰富度指数、多样性指数和均匀度指数。在添加氮素的条件下,水分的添加与氮素发生的显著的互作负效应,使物种丰富度、Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数的变化趋势发生变化,随施氮水平的增加,植物物种多样性下降速率加快。这与赵新风^[30]在准噶尔盆地荒漠草地进行的养分和水分的添加试验的观点相似,在处理后的第三年,水肥的互作效应会显著减少 Shannon-Weiner 指数。水分的添加,促进了氮肥肥效的发挥,使贝加尔针茅草原植物群落物种丰富度的减少和多样性指数的下降提前。有研究表明,凋落物与群落物种多样性有着一定的关系^[31],植物凋落物的积累减小了群落物种多样性^[32],氮素的添加导致植物生物量的增加和凋落物的增加,允许部分物种萌发并穿过凋落物层^[33],抑制了某些物种的萌发^[34],本研究发现,扁蓿豆、牧马豆和线叶菊等杂类草地上生物量随着施氮水平的增加显著减少。除此之外,群落水平的自疏作用也降低了群落植物物种多样性。群落水平的自疏假说^[35-36]认为施肥后生产力的增加伴随着个体大小的增大(尤其是禾本科植物),个体大小的增加导致密度降低,使群落中一些伴生种丧失,从而使得群落植物物种多样性下降。

3.2 草原群落常见植物地上生物量对氮素和水分添加的响应

施肥增加了土壤中的有效资源,影响植物地下及地上部分的生长,从而引起植物群落的变化。氮素和水分是植物生长的两个重要的限制性因素^[37-38]。不同植物对氮素和水分的吸收利用不同,敏感性不同,使得植物群落发生的变化不同^{[31][39]}。在本研究中,N100 施氮水平显著增加贝加尔针茅草原植物群落中禾草的生物量,但当产量达到一定极限后,施氮水平的增加反而会使贝加尔针茅、糙隐子草和羽茅的产量下降,这与他人对禾草施用氮肥的规律研究结果相一致^[40-41]。水分是中国北方天然草原生产力的主要限制因子^[42],降水的增加有助于氮肥肥效的发挥。由本试验结果也可看出,水分与氮素之间存在互作效应,水分的添加可以促进氮素的吸收,提高禾草对氮素的利用,使禾草产量下降延迟。但是羊草作为多年生根茎禾草,其地上生物量随着施氮水平的增加而显著增加,最后在群落中占据了最主要的位置。根茎型禾草通过在地下根茎上(地下

0—20cm) 新生出的大量分枝进行繁殖(分蘖), 进而增加其生物量^[43], 在施氮水平较高时, 根茎植物会延伸出更多的分株利用更多的养分^[44]。本实验中, N300 施氮量和水分的添加对根茎型禾草羊草的促进效果最为显著, 使其在群落中占据了重要的地位, 这与潘庆民^[45]的研究结果相似。相比豆科植物, 施氮显著促进禾本科植物生物量积累, 与祁瑜等^[46]观点相一致。Niklaus 等^[47]人报道土壤中的氮素不会抑制豆科植物的生长, 90% 的豆科植物的 N 来源于共生性 N 固定。Van Kessel 等^[48]人的研究结果表明豆科植物对土壤氮素的变化没有响应。也有研究表明水分和较低的施氮水平可以促进根瘤的形成, 有助于植物的生长^[49-50]。而在本实验中, 牧马豆、扁蓿豆地上生物量随着施氮水平的增加显著减少, 可能与施氮的时间和施氮量不同有关, 氮素的添加抑制了豆科植物的生物固氮作用, 使其生物量减少。冷蒿、星毛委陵菜作为退化草地的指示植物, 氮素和水分添加显著减少了其地上生物量, 而且水分的影响效应较显著, 说明氮素和水分的添加有助于退化草地的恢复。草地麻花头、寸草苔和线叶菊作为贝加尔针茅草原常见的伴生种, 对不同氮素水平和水分的添加的响应也各有不同。综上所述, 不同植物对养分的利用能力不同, 对氮素和水分添加的响应不同^[46], 从而引起植物种群的变化不同。此外, 由于羊草和贝加尔针茅等禾草对氮素的利用能力较高, 它们的增加占据了大量的空间与资源, 遮蔽了其他矮小的物种, 从而在地上光竞争中取胜^[51], 使得星毛委陵菜、牧马豆、扁蓿豆和线叶菊等杂类草和小半灌木的空间和可利用的资源减少, 限制了他们的增长, 地上生物量显著减少, 与何丹, 王长庭等^[52-53]观点相一致。除此之外, 本试验群落结构的变化也趋向于 Tilman^[54]的生态位优先占领假说, 退化草地施肥后, 促进了禾草类植物的生长, 作为弱势种群的植物在竞争中被淘汰而消失, 杂类草的减少对于草地植物群落物种多样性的减少也起到了至关重要的作用。

4 结论

氮素和水分添加对贝加尔针茅草原植物群落物种多样性有显著影响。不同的水分和氮素添加水平, 对草原植物群落物种多样性影响不同。草原植物群落物种多样性随着施氮水平的增加总体上呈现下降趋势, 单一水分添加有助于群落植物物种多样性的增加; 氮素和水分之间存在显著的互作效应, 氮素添加条件下, 水分的添加会加快群落植物物种多样性的下降。

不同物种对氮素和水分添加的响应不同。羊草和贝加尔针茅对氮素添加响应程度较高, 水分添加对氮素添加有放大效应; 羊草作为根茎型禾草, 对氮素和水分添加的响应高于贝加尔针茅、羽茅和糙隐子草等丛生型禾草。氮素和水分添加使群落中禾草地位明显提升, 相反使扁蓿豆、线叶菊、星毛委陵菜和牧马豆等杂类草的地上生物量随着氮素添加水平的增加逐渐减少, 在群落中的地位逐渐下降。

参考文献(References):

- [1] Ladwig L M, Collins S L, Swann A L, Xia Y, Allen M F, Allen E B. Above- and below ground responses to nitrogen addition in a Chihuahuan Desert grassland. *Oecologia*, 2012, 169(1): 177-185.
- [2] Liu X J, Zhang Y, Han W X, Tang A, Shen J L, Cui Z L, Vitousek P, Erisman J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F S. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [3] IPCC. Climatic Change 2007: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers. IPCC WGI Fourth Assessment Report. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [4] Wright R F, Rasmussen L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101(1/3): 1-7.
- [5] Magill A H, Aber J D, Currie W S. Ecosystem response to 15 years of chronic nitrogen additions at the Harvard Forest LTER, Massachusetts, USA. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 7-28.
- [6] Mitchell M J, Driscoll C T, Porter J H. The adirondack manipulation and modeling project (AMMP): design and preliminary results. *Forest Ecology and Management*, 1994, 68(1): 87-100.
- [7] Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Handbook of the Convention on Biological Diversity including its Cartagena Protocol on Biosafety. 3rd ed. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal Canada, 2005.
- [8] 李娟. 长期不同施肥制度土壤微生物学特性及其季节变化 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.

- [9] Xu G L, Mo J M, Zhou G Y. Preliminary response of soil fauna to simulated N deposition in three typical subtropical forests. *Pedosphere*, 2006, 16(5): 596-601.
- [10] 李仁洪, 涂利华, 胡庭兴, 张健, 鲁洋, 刘文婷, 雒守华, 向元彬. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1649-1655.
- [11] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, Naeem S, Pan Q M, Huang J H, Zhang L X, Han X G. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from Inner Mongolia Grasslands. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 358-372.
- [12] Zhang N L, Wan S Q, Li L H. Impacts of urea N addition on soil microbial community in a semiarid temperate steppe in northern China. *Plant and Soil*, 2008, 311(1/2): 19-28.
- [13] 赵新风, 徐海量, 张鹏, 张青青. 养分与水分添加对荒漠草地植物钠猪毛菜功能性状的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 134-146.
- [14] 叶鑫, 周华坤, 刘国华, 姚步青, 赵新全. 高寒矮生嵩草草甸主要植物物候特征对养分和水分添加的响应. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 147-158.
- [15] 杨殿林, 韩国栋, 胡跃高, 乌云格日勒. 放牧对贝加尔针茅草原群落植物多样性和生产力的影响. *生态学杂志*, 2006, 25(12): 1470-1475.
- [16] 王正文, 邢福, 祝廷成, 李宪长. 松嫩平原羊草草地植物功能群组成及多样性特征对水淹干扰的响应. *植物生态学报*, 2002, 26(6): 708-716.
- [17] 陈文业, 赵明, 李广宇, 魏强, 王芳, 刘振恒, 朱丽, 张继强, 孙飞达. 不同类型施肥水平对甘南沙化高寒草甸植物群落特征及生产力的影响. *自然资源学报*, 2012, 27(2): 254-267.
- [18] 王珍. 增温和氮素添加对内蒙古短花针茅荒漠草原植物群落、土壤及生态系统碳交换的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- [19] 江小蕾, 张卫国, 杨振宇, 王刚. 不同干扰类型对高寒草甸群落结构和植物多样性的影响. *西北植物学报*, 2003, 23(9): 1479-1485.
- [20] Ren Z W, Li Q, Chu C J, Zhao L Q, Zhang J Q, Ai D, Yang Y B, Wang G. Effects of resource additions on species richness and ANPP in an alpine meadow community. *Journal of Plant Ecology*, 2010, 3(1): 25-31.
- [21] Wang C T, Long R J, Wang Q L, Liu W, Jing Z C, Zhang L. Fertilization and litter effects on the functional group biomass, species diversity of plants, microbial biomass and enzyme activity of two alpine meadow communities. *Plant and Soil*, 2010, 331(1/2): 377-389.
- [22] Goldberg D E, Miller T E. Effects of different resource additions on species diversity in an annual plant community. *Ecology*, 1990, 71(1): 213-225.
- [23] Huberty L E, Gross K L, Miller C J. Effects of nitrogen addition on successional dynamics and species diversity in Michigan old-fields. *Journal of Ecology*, 1998, 86(5): 794-803.
- [24] 孙斌. 三种改良措施对高寒退化草地植被的影响. *甘肃农业大学学报*, 2005, 40(6): 797-801.
- [25] 沈景林, 孟杨, 胡文良, 连大伟. 高寒地区退化草地改良试验研究. *草业学报*, 1999, 8(1): 9-14.
- [26] Suding K N, Collins S L, Gough L, Clark E E, Gross K L, Milchunas D G, Pennings S. Functional- and abundance-based mechanisms explain diversity loss due to N fertilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences(USA)*, 2005, 102(12): 4387-4392.
- [27] Fan L L, Li Y, Tang L S, Ma J. Combined effects of snow depth and nitrogen addition on ephemeral growth at the southern edge of the Gurbantunggut Desert, China. *Journal of Arid Land*, 2013, 5(4): 500-510.
- [28] 郑华平, 陈子萱, 王生荣, 牛俊义. 施肥对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响. *草业学报*, 2007, 16(5): 34-39.
- [29] 白春利, 阿拉塔, 陈海军, 单玉梅, 额尔敦花, 王明玖. 氮素和水分添加对短花针茅荒漠草原植物群落特征的影响. *中国草地学报*, 2013, 35(2): 69-75.
- [30] 赵新风, 徐海量, 张鹏, 涂文霞, 张青青. 养分与水分添加对荒漠草地植物群落结构和物种多样性的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 167-177.
- [31] Zhang C H, Li S G, Zhang L M, Xin X P, Liu X R. Effects of species and low dose nitrogen addition on litter decomposition of three dominant grasses in Hulun Buir Meadow Steppe. *Journal of Resources and Ecology*, 2013, 4(1): 20-26.
- [32] Xiong S, Nilsson C. Dynamics of leaf litter accumulation and its effects on riparian vegetation: A review. *The Botanical Review*, 1997, 63(3): 240-264.
- [33] 李禄军, 曾德慧, 于占源, 艾桂艳, 杨丹, 毛瑛. 氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1838-1844.
- [34] 孙儒泳. 动物生态学原理 (第三版). 北京: 北京师范大学出版社, 2001: 527-527.
- [35] Stevens M H H, Carson W P. Plant density determines species richness along an experiment fertility gradient. *Ecology*, 1999, 80(2): 455-465.
- [36] 罗燕江. 退化和恢复中的植物群落: 以高寒草甸为例的理论和试验研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [37] Huang Y X, Zhao X Y, Zhang H X, Japhet W, Zuo X A, Luo Y Y, Huang G. Allometric effects of *Agriophyllum squarrosum* in response to soil nutrients, water, and population density in the Horqin Sandy Land of China. *Journal of Plant Biology*, 2009, 52(3): 210-219.

- [38] Huang Y X, Zhao X Y, Zhang H X, Huang G, Luo Y Y, Japhet W. A comparison of phenotypic plasticity between two species occupying different positions in a successional sequence. *Ecological Research*, 2009, 24(6): 1335-1344.
- [39] Johansson O, Palmqvist K, Olofsson J. Nitrogen deposition drives lichen community changes through differential species responses. *Global Change Biology*, 2012, 18(8): 2626-2635.
- [40] 车敦仁. 高寒禾草施氮效应浅析. *青海畜牧兽医杂志*, 1994, 24(5): 1-6.
- [41] 德科加, 周青平, 刘文辉, 徐成体, 王德利. 施氮量对青藏高原燕麦产量和品质的影响. *中国草地学报*, 2007, 29(5): 43-48.
- [42] 周广胜, 张新时. 全球变化的中国气候植被分类研究. *植物学报*, 1996, 38(1): 8-17.
- [43] 郭金丽, 李青丰. 克隆整合对白草克隆生长的影响. *中国草地学报*, 2008, 30(6): 43-48.
- [44] Mao W, Zhang T H, Li Y L, Zhao X Y, Huang Y X. Allometric response of perennial *Pennisetum centrasiaticum* Tzvel to nutrient and water limitation in the Horqin Sand Land of China. *Journal of Arid Land*, 2012, 4(2): 161-170.
- [45] 潘庆民, 白永飞, 韩兴国, 杨景成. 氮素对内蒙古典型草原羊草种群的影响. *植物生态学报*, 2005, 29(2): 311-317.
- [46] 祁瑜, 黄永梅, 王艳, 赵杰, 张景慧. 施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响. *生态学报*, 2011, 31(18): 5121-5129.
- [47] Niklaus P A, Leadley P W, Stöcklin J, Körner C. Nutrient relations in calcareous grassland under elevated CO₂. *Oecologia*, 1998, 116(1/2): 67-75.
- [48] Van Kessel C, Horwath W R, Hartwig U, Harris D. Net soil carbon input under ambient and elevated CO₂ concentrations: isotopic evidence after 4 years. *Global Change Biology*, 2000, 6(4): 435-444.
- [49] Achakzai A K K. Effect of various level of nitrogen fertilizer on nodulation of pea cultivars. *Pakistan Journal of Botany*, 2007, 39(5): 1673-1680.
- [50] Vasileva V, Kostov O, Vasilev E, Athar M. Effect of mineral nitrogen fertilization on growth characteristics of lucerne under induced water deficiency stress. *Pakistan Journal of Botany*, 2011, 43(6): 2925-2928.
- [51] Bakelaar R G, Odum E P. Community and population level responses to fertilization in an old-field ecosystem. *Ecology*, 1978, 59(4): 660-665.
- [52] 何丹, 李向林, 何峰, 万里强, 李春荣. 施氮对退化天然草地主要物种地上生物量和重要值的影响. *中国草地学报*, 2009, 31(5): 42-46.
- [53] 王长庭, 王根绪, 刘伟, 王启兰. 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响. *生态学报*, 2013, 33(10): 3103-3113.
- [54] Tilman D. *Resource Competition and Community Structure*. Princeton; Princeton University Press, 1982.