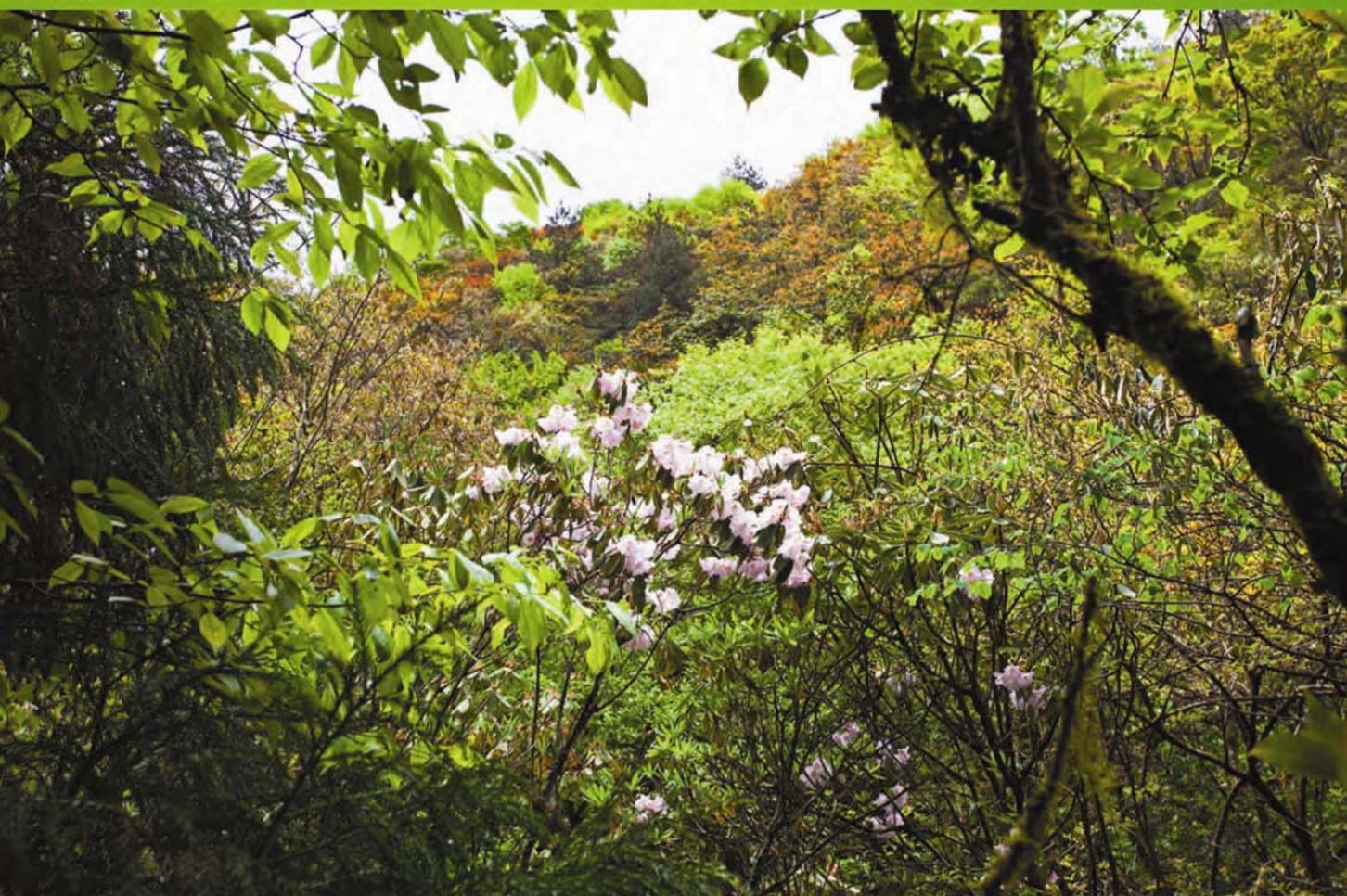


ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 21 期 Vol.33 No.21 **2013**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 21 期      2013 年 11 月      (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究····· 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等 (6747)
- 气候变化对传染病爆发流行的影响研究进展····· 李国栋,张俊华,焦耿军,等 (6762)
- 好氧甲烷氧化菌生态学研究进展····· 负娟莉,王艳芬,张洪勋 (6774)
- 氮沉降强度和频率对羊草叶绿素含量的影响····· 张云海,何念鹏,张光明,等 (6786)
- 世界蜘蛛的分布格局及其多元相似性聚类分析····· 申效诚,张保石,张 锋,等 (6795)
- 风向因素对转基因抗虫棉花基因漂移效率的影响····· 朱家林,贺 娟,牛建群,等 (6803)

### 个体与基础生态

- 长江口及东海春季底栖硅藻、原生动物和小型底栖生物的生态特点····· 孟昭翠,徐奎栋 (6813)
- 长江口横沙东滩围垦潮滩内外大型底栖动物功能群研究····· 吕巍巍,马长安,余 骥,等 (6825)
- 沔河沿岸土壤和优势植物重金属富集特征和潜在生态风险····· 杨 阳,周正朝,王欢欢,等 (6834)
- 盐分和底物对黄河三角洲区土壤有机碳分解与转化的影响····· 李 玲,仇少君,檀菲菲,等 (6844)
- 短期夜间低温胁迫对秋茄幼苗碳氮代谢及其相关酶活性的影响····· 郑春芳,刘伟成,陈少波,等 (6853)
- 32 个切花菊品种的耐低磷特性····· 刘 鹏,陈素梅,房伟民,等 (6863)
- 年龄和环境条件对泥蚶富集重金属镉和铜的影响····· 王召根,吴洪喜,陈肖肖,等 (6869)
- 角倍蚜虫瘦对盐肤木光合特性和总氮含量的影响····· 李 杨,杨子祥,陈晓鸣,等 (6876)
- 多噬伯克霍尔德氏菌 WS-FJ9 对草甘膦的降解特性····· 李冠喜,吴小芹,叶建仁 (6885)
- 金龟甲对蓖麻叶挥发物的触角电位和行为反应····· 李为争,杨 雷,申小卫,等 (6895)

### 种群、群落和生态系统

- 白洋淀生态系统健康评价····· 徐 菲,赵彦伟,杨志峰,等 (6904)
- 珠海鹤洲水道沿岸红树林湿地大型底栖动物群落特征····· 王 卉,钟 山,方展强 (6913)
- 典型森林和草地生态系统呼吸各组分间的相互关系····· 朱先进,于贵瑞,王秋风,等 (6925)
- 抚育间伐对油松人工林下大型真菌的影响····· 陈 晓,白淑兰,刘 勇,等 (6935)
- 百山祖自然保护区植物群落 beta 多样性····· 谭珊珊,叶珍林,袁留斌,等 (6944)
- 土霉素对堆肥过程中酶活性和微生物群落代谢的影响····· 陈智学,谷 洁,高 华,等 (6957)

### 景观、区域和全球生态

- 兴安落叶松针叶解剖结构变化及其光合能力对气候变化的适应性····· 季子敬,全先奎,王传宽 (6967)
- 盐城海滨湿地景观演变关键土壤生态因子与阈值研究····· 张华兵,刘红玉,李玉凤,等 (6975)

半干旱区沙地芦苇对浅水位变化的生理生态响应 .....	马赞花,张铜会,刘新平 (6984)
SWAT 模型融雪模块的改进 .....	余文君,南卓铜,赵彦博,等 (6992)
科尔沁沙地湖泊消涨对气候变化的响应 .....	常学礼,赵学勇,王 玮,等 (7002)
贝壳堤岛 3 种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征 .....	夏江宝,张淑勇,王荣荣,等 (7013)
三峡库区古夫河着生藻类叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素 .....	吴述园,葛继稳,苗文杰,等 (7023)

### 资源与产业生态

煤炭开发对矿区植被扰动时空效应的图谱分析——以大同矿区为例 .....	黄 翌,汪云甲,李效顺,等 (7035)
-------------------------------------	----------------------

### 学术信息与动态

《中国当代生态学研究》新书推介 .....	刘某承 (7044)
-----------------------	------------

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 300 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 30 \* 2013-11



**封面图说:** 百山祖保护区森林植物群落——百山祖国家级自然保护区位于浙西南闽浙交界处,由福建武夷山向东北伸展而成,主峰海拔 1856.7m,为浙江省第二高峰。其独特的地形和水文地理环境形成了中亚热带气候区中一个特殊的区域,保存着十分丰富的植物种质资源以及国家重点保护野生动植物种,尤其是 1987 年由国际物种保护委员会列为世界最濒危的 12 种植物之一的百山祖冷杉,是第四纪冰川的孑遗植物,素有“活化石”之称。随着海拔的升高,其植被为常绿阔叶林、常绿-落叶阔叶混交林、针阔混交林、针叶林、山地矮林和山地灌草丛。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201207050939

张云海,何念鹏,张光明,黄建辉,韩兴国.氮沉降强度和频率对羊草叶绿素含量的影响.生态学报,2013,33(21):6786-6794.

Zhang Y H, He N P, Zhang G M, Huang J H, Han X G. Nitrogen deposition and *Leymus chinensis* leaf chlorophyll content in Inner Mongolian grassland. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(21): 6786-6794.

## 氮沉降强度和频率对羊草叶绿素含量的影响

张云海<sup>1,4</sup>, 何念鹏<sup>2</sup>, 张光明<sup>1</sup>, 黄建辉<sup>1</sup>, 韩兴国<sup>1,3,\*</sup>

(1. 植被与环境变化国家重点实验室, 中国科学院植物研究所, 北京 100093;

2. 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 森林与土壤国家重点实验室, 沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**氮沉降强度和沉降频率是决定其对陆地生态系统影响的重要决定因素。结合当前世界上各地区的氮沉降状况,设计了包括 9 个氮沉降梯度的长期控制实验,并将氮沉降分为两种沉降频率(1 年 2 次和每月 1 次)、草原管理方式分为封育和割草两种。基于上述实验平台的优势植物(羊草)叶片叶绿素含量来探讨氮沉降方式(强度和频度)和草原管理方式(封育和打草)对草地生态系统结构和功能的影响。实验结果表明:1)氮沉降显著增加了植物叶片叶绿素含量( $P < 0.001$ );2)每月 1 次模拟氮沉降处理的植物叶绿素含量显著低于 1 年 2 次氮沉降的处理( $P = 0.026$ );3)在相同的氮沉降强度处理下,打草地相对于封育草地具有更高的叶绿素含量( $P = 0.012$ );4)羊草叶绿素含量与其叶片氮浓度显著正相关( $P < 0.001$ );5)羊草叶绿素含量与该植株高度极显著正相关( $P < 0.001$ )。结果表明 1 年 1 次或 1 年 2 次的模拟氮沉降(类似于施肥处理或低频率的氮素添加实验)可能会夸大真实氮沉降对草地生态系统结构和功能的影响,今后在外推类似实验结论时应更加谨慎。此外,氮沉降下打草管理有利于增加了植物叶片叶绿素含量,可提高植物的光合作用,因此在未来氮沉降加剧状况下,打草可以保持或提高内蒙古草地生产力,有利于该地区草地的可持续利用。

**关键词:**草原管理;氮沉降;割草;内蒙古;羊草;叶绿素

## Nitrogen deposition and *Leymus chinensis* leaf chlorophyll content in Inner Mongolian grassland

ZHANG Yunhai<sup>1,4</sup>, HE Nianpeng<sup>2</sup>, ZHANG Guangming<sup>1</sup>, HUANG Jianhui<sup>1</sup>, HAN Xingguo<sup>1,3,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101 China

3 State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Yuquan Road, Beijing 100049, China

**Abstract:** Nitrogen (N) is a key element for plant growth of terrestrial ecosystems, and it is a commonly limiting factor for grassland productivity in semiarid grasslands. Nitrogen deposition has increased 2—5 times since 1950s. Some studies have documented that N deposition has positive effects on primary production or negative effects on biodiversity, soil nutrition etc; however, the results of previous studies are still inconsistent or even controversial. We designed a simulation nitrogen deposition experiment involved 9 N deposition gradients in Inner Mongolian grassland in 2008. Moreover, the experiment includes 2 N deposition frequencies (applied twice a year and applied every month equally) and 2 grassland management regimes (fenced grassland and mowing grassland). In this paper, we used the Chlorophyll content (SPAD value) of *Leymus*

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划 973 项目(2009CB825103); 国家自然科学基金面上项目(31170433, 30870407)

**收稿日期:**2012-07-05; **修订日期:**2013-06-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xghan@ibcas.ac.cn

*chinensis* leaf, the dominant plant species in the region, in order to explore the effect of N deposition intensity and frequency and grassland management regimes on the structure and function of grassland ecosystem in Inner Mongolia. The results showed that 1) N deposition significantly increased leaf chlorophyll content; 2) the content of leaf chlorophyll in low N deposition frequency treatment was significantly higher than that in high N deposition frequency treatment; 3) the content of leaf chlorophyll was higher under mowing than under fenced, 4) leaf N concentration was highly consistent with leaf chlorophyll content, and 5) there existed positive linear relationship between plant height and leaf chlorophyll content. Totally, our finding first explored the effect of N deposition intensity and frequency and grassland management regimes on the structure and function of grassland ecosystem (in view of leaf chlorophyll content) in Inner Mongolia, and found that the low N deposition frequency (once per year or twice per year, as fertilization) should be magnified the effect of elevated N deposition in future. Therefore, we should be cautious to extend the results come from these low N deposition frequency to larger scale. Moreover, N deposition increased the leaf chlorophyll content and favored the primary productivity, and therefore can be better facilitated the grassland sustainable development in Inner Mongolia.

**Key Words:** grassland management; nitrogen deposition; mowing; Inner Mongolia; *Leymus chinensis*; leaf chlorophyll

氮是重要的生命元素,它是每个细胞的重要组成部分。植物利用叶绿素(氮是必需元素)通过光合作用将光能转变为化学能、将无机物转变为有机物,供植物自身及其他有机体利用<sup>[1]</sup>。虽然植物生活在一个含有大量氮气的空气中(体积分数 78.12%),但由于氮气化学性质稳定,很难被大部分植物转化为可利用态氮;因此,土壤有效氮(氨态氮和硝态氮)的多少直接影响着植物的生长。LeBauer 和 Treseder 的研究表明陆地生态系统大多都处于氮素缺乏的状态<sup>[2]</sup>。然而自 20 世纪中叶以来,化石燃料燃烧、化学氮肥生产和使用及畜牧业的扩张等人类活动向大气中排放的含氮化合物(NH<sub>x</sub>和NO<sub>y</sub>)激增,这些含氮化合物经过风、雨、雪的转运又沉降到生态系统,该沉降过程简称为大气氮沉降<sup>[3-4]</sup>。据估计 1860 年全球大气氮沉降总量约为 34 Tg(1 Tg = 10<sup>12</sup> g),到 1955 年已增至 100 Tg,预计到 2050 年,全球大气氮沉降总量约为 200 Tg<sup>[3]</sup>。随着经济的高速发展,中国平均大气氮沉降已达到 1.2 g N·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,并成为世界三大高氮沉降区之一<sup>[3,5-6]</sup>。目前,我国科学家围绕氮沉降及其对陆地生态系统结构和功能的影响已经开展了大量的研究工作<sup>[7-10]</sup>,然而已开展的模拟氮沉降研究主要以一次或者生长季多次添加氮素为主,很少有将生长季与寒冷冬季结合的模拟氮沉降实验<sup>[11]</sup>。因此,现有的模拟氮沉降实验结果是否能真实地体现大气氮沉降对我国陆地生态系统结构和功能的影响还有待进一步证实。

内蒙古草原是我国最主要的畜牧业基地,其草地生态系统结构和功能的改变必将直接影响到我国畜牧业的产业结构和食物安全<sup>[12]</sup>。目前内蒙古的氮沉降水平较低(< 0.5 g N·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>),但随着工业的发展其氮素沉降水平必将增加<sup>[13]</sup>,但是氮素的增加会怎么影响草原生态系统的结构和功能还没有较明确的研究结论,因此做好氮沉降的研究对预测未来草地结构和功能的变化、对草地适应性管理都至关重要<sup>[5]</sup>。同时围栏封育和打草是内蒙古草原的主要土地利用方式,如何将氮沉降与草原生态系统的管理方式相结合来开展评估工作,对研究我国草地生态系统未来对大气氮沉降增加的响应和适应具有重要理论和实际意义。

叶绿素是绿色植物光合作用的重要结构体,其含量的多少是衡量植物光合作用的重要指标<sup>[14]</sup>。羊草是我国典型草原的优势物种<sup>[15]</sup>,因此氮沉降对羊草的影响必然会影响到草地群落的组成和物质循环<sup>[16]</sup>。前人已经发现氮素添加会提高羊草叶片叶绿素含量<sup>[17-18]</sup>,但关于不同频率的氮添加对植物叶绿素含量的研究还未见报道;另外,打草管理会带走生态系统内的氮素,降低生态系统的可利用氮,进而改变氮循环,然而氮沉降下的打草管理是否会影响到羊草的叶片叶绿素含量也还不清楚<sup>[19-21]</sup>。本文通过分析不同氮沉降频率和不同草原管理方式下群落优势种(羊草)的叶绿素含量的变化,探讨未来氮沉降增加趋势下草地生态系统结构和功能的变化;通过研究羊草的对氮沉降强度和频率的响应趋势,为草原资源的合理开发与利用提供的理论基础。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 实验区自然概况

实验区位于中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站的 1999 围封羊草草地,其地理坐标为北纬 43°32'45"—43°33'10",东经 116°40'30"—116°40'50",海拔 1200 m,该地区属温带半干旱典型草原区<sup>[22]</sup>。1981—2010 年间年均气温为 0.3 °C,最冷月(1 月)-21.6 °C,最热月(7 月)18.2 °C,无霜期 91 d。年均降水量 349.7 mm,其中 5—8 月降水量占全年降雨量的 74.2%。土壤为暗栗钙土,土层厚 1 m 以上,腐殖质层厚 20—30 cm,钙积层不明显或不存在,有时在 50—60 cm 以下有轻微的假菌丝状碳酸钙的淀积物<sup>[23]</sup>。羊草草原主要物种包括羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.)、大针茅(*Stipa grandis* P. Smirn.)、西伯利亚羽茅(*Achnatherum sibiricum* (L.) Keng)、冰草(*Agropyron cristatum* Roshev.)、洽草(*Koeleria cristata* (L.) Pers.)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng.)和黄囊苔草(*Carex korshinskyi* Kom.);其中,禾草是构成植物群落的主体,生物量比率>80%。1999 年,在自由放牧草地的基础上,建立围栏对样地实验封育,排除了牛、羊等大型动物的取食和践踏。

### 1.2 实验设计

模拟氮沉降实验始于 2008 年,整个实验平台采用完全随机区组设计,分别设置了 9 个氮沉降梯度(0, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 50 g N·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、2 种模拟氮沉降频度(一年 2 次和每月 1 次;图 1)。其中 1 年 2 次模拟氮沉降处理分别在 6 月和 12 月初进行。同时设置了 1 个对照处理 CK(不添加氮,也不加水)。在模拟氮沉降下设置两种草地管理方式:围栏封育和割草。割草处理于每年 8 月底进行 1 次,留茬 10 cm,模拟牧民的机械打草。因此,本实验一共设置了 38 个实验处理,每个实验处理 10 次重复,实验小区面积 8 m × 8 m。实验处理所用氮素为 99.5% 的硝酸铵(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)。在生长季(5—10 月),模拟氮沉降先将称好的硝酸铵溶解在蒸馏水中(其中每月 1 次氮处理为每月溶解在 1.5 L 里;两种氮沉降频率每年均加入共 9.0 L),再用背式喷雾器均匀喷施;在非生长季(11—4 月),将硝酸铵与 500 g 经过焙烧的细砂混合,再均匀撒播在实验样地内。细砂是先经过 1 mm 筛子去除明显的植物体和大石砾,再用浓硫酸浸泡 2d 后,然后捞出细砂用清水洗净后经 105 °C 烘箱 48 h 烘干。

### 1.3 取样与测定

在 2011 年 5 月 25—31 日之间,首先在每个实验小区里标记 30 株羊草;2011 年 7 月 28—31 日间,在每个样地随机选取已标记的 5 株植物测定植株高度和叶绿素含量。植株高度是采用卷尺测定。选择每株羊草上所有完全展开的绿色叶片的叶绿素含量(每株的叶片数为 5 到 7 片之间),测定仪器为 SPAD-502Puls 便携式叶绿素仪(Konica Minolta Sensing, INC.);实际操作过程:每个叶片于中间位置测定 1 次,每株羊草的所有叶片的叶绿素含量值取均值为该株羊草的叶绿素含量值。

SPAD-502Plus 叶绿素仪有 2 个发射光源,分别发射 660 nm 的红色光和 940 nm 的红外光,通过对 660 nm 的红外光被叶片吸收和放射情况测定相对叶绿素含量值,利用 940 nm 的红外光的发射和接收来消除叶片厚度等对测量结果的影响<sup>[24]</sup>。利用公式(1)计算叶绿素 SPAD 值:

$$\text{SPAD} = K \log I_o \left[ \left( \frac{I_{R1}}{I_{R0}} \right) / \left( \frac{R_1}{R_0} \right) \right] \quad (1)$$

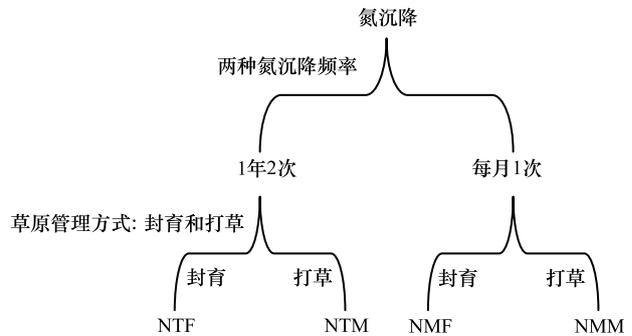


图 1 模拟氮沉降实验设计

Fig. 1 Experimental design of simulating N deposition in Inner Mongolian grasslands. Treatments of twice N + fence, monthly N + fence, twice N + mowing, and monthly N + mowing are abbreviated to NTF, NMF, NTM, and NMM, respectively

氮沉降强度共设置了 9 个:0, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20 and 50 g N·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>;氮沉降频率共设置了 2 种:1 年 2 次和每月 1 次;设置了两种草地管理方式:封育和打草;共 4 种处理:NTF: 封育下一年 2 次氮;NMF: 封育下每月 1 次氮;NTM: 打草下一年 2 次氮;NMM: 打草下每月 1 次氮

式中,  $K$  为常数;  $I_{R1}$  为接收到的 940 nm 红外线强度,  $I_{R0}$  为发射红外光强度;  $R_1$  为接收到的 660 nm 红光强度;  $R_0$  为发射红光强度。

#### 1.4 统计分析

首先对每个实验小区的 5 株羊草的所有绿色完全展开叶的叶绿素含量取平均值, 然后再进行后续的统计分析。本文采用 3 因素方差分析来探讨氮沉降频率、氮沉降强度和草原管理方式对羊草叶绿素含量的影响及其交互效应。利用双因素方差分析和 T 检验来进一步分析不同的氮沉降频率和草原管理方式下, 氮沉降强度对叶绿素含量的影响。利用单因素方差分析来比较各处理间的叶绿素含量的差异。显著性水平为  $\alpha = 0.05$ 。所有统计过程均使用 SPSS 11.0 完成, 所有图形均使用 SigmaPlot 10.0 绘制。

## 2 结果

### 2.1 氮沉降及其频率对叶绿素含量的影响

三因素方差分析的结果表明(表 1): 氮沉降及其频率均显著地改变了羊草叶片的叶绿素含量 ( $P < 0.05$ )。进一步的分析表明: 随氮沉降的增加, 羊草叶片叶绿素含量也显著增加(表 2); 其相互之间的关系以二次抛物线关系更合适(图 2), 其拐点在 30—40  $\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  之间。一年两次氮沉降下的羊草叶片叶绿素含量显著高于每月 1 次氮沉降下的值(表 3, 图 3); 再进一步分析表明: 产生显著差异的氮沉降浓度是 50  $\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (表 3), 在这一氮浓度下的差异产生主要是由于割草管理导致的 ( $P = 0.004$ ); 围栏封育下, 氮沉降频率对羊草叶片叶绿素含量没有显著影响(图 3)。

表 1 模拟氮沉降频率( $F$ )、强度( $N$ )、打草( $M$ )对羊草叶绿素含量影响的三因素方差分析结果

Table 1 The results of three-way ANOVAs of nitrogen deposition frequency ( $F$ ) and intensity ( $N$ ) and mowing ( $M$ ) on *L. chinensis* leaf chlorophyll content (SPAD value)

	df 自由度	$F$	$P$		df 自由度	$F$	$P$
F 氮频率	1	4.998	0.026	M 打草	1	6.432	0.012
N 氮	8	37.647	<0.001	F × M 氮频率×打草	1	0.233	0.630
F × N 氮频率×氮	8	1.318	0.233	M × N 打草×氮	8	1.453	0.173
F × M × N 氮频率×打草×氮	8	0.962	0.465				

### 2.2 割草和氮沉降对羊草叶片叶绿素含量的影响

在氮沉降处理下, 割草管理相对于围栏封育显著增加了羊草叶片叶绿素含量(表 1, 图 3)。割草管理下, 羊草叶片叶绿素含量随氮沉降的增加呈二次曲线的关系, 与围栏封育状态下反应类似(图 2)。从表 3 可以得出, 在氮沉降增加下, 割草管理对羊草叶片叶绿素含量的影响是在 2 和 20  $\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  这两个氮沉降量下差异显著 ( $P < 0.05$ ); 具体分析发现同一氮沉降频率下, 围栏封育与割草管理对羊草叶片叶绿素含量在 2  $\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  以下并没有显著差异, 而在 20  $\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  下割草管理会导致叶片叶绿素含量显著高于围栏封育下的值 ( $P < 0.001$ )。

### 2.3 叶片氮浓度, 植株高度与叶绿素含量

4 种处理组合(NTF、NMF、NTM 和 NMM)下羊草植株高度与叶片叶绿素含量均显著相关 ( $P < 0.001$ ), 同时羊草叶片叶绿素含量值与叶片氮浓度亦呈极显著相关 ( $P < 0.001$ )。从图 4 可以得出: 在围栏封育与割草管理下, 羊草叶片氮浓度与叶片叶绿素含量呈极显著的线性相关关系 ( $r = 0.65$ ,  $P < 0.001$ ), 其线性方程为:

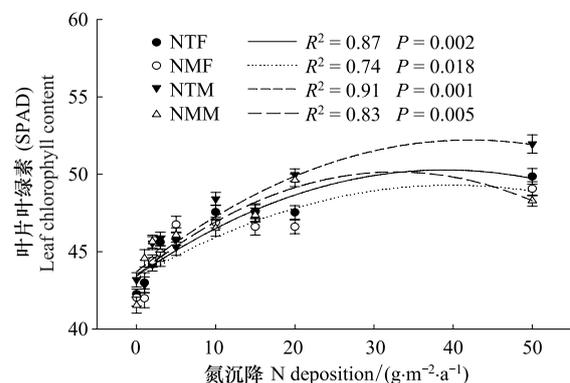


图 2 4 种实验处理下羊草叶绿素含量随氮沉降增加的关系  
Fig.2 The relationships of *L. chinensis* leaf chlorophyll content with treatments along N gradient

表 2 羊草叶片叶绿素含量随氮沉降增加的变化  
Table 2 Changes in *L. chinensis* leaf chlorophyll content (SPAD value; mean±SE, n=10) with increasing nitrogen deposition

处理 Treatment	氮 N/(g·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )									
	ck	0	1	2	3	5	10	15	20	50
NTF 封育下一年两次氮	42.1±1.1 <sup>d</sup>	42.3±1.2 <sup>d</sup>	43.0±1.1 <sup>d</sup>	44.2±0.7 <sup>cd</sup>	45.6±0.7 <sup>bc</sup>	45.8±0.7 <sup>bc</sup>	47.6±0.6 <sup>ab</sup>	47.6±0.8 <sup>ab</sup>	47.5±0.6 <sup>ab</sup>	49.9±0.8 <sup>a</sup>
NMF 封育下每月一次氮	42.1±1.1 <sup>e</sup>	42.0±0.9 <sup>e</sup>	42.0±1.0 <sup>e</sup>	44.4±0.6 <sup>bc</sup>	44.9±0.8 <sup>b</sup>	46.6±1.1 <sup>ab</sup>	46.9±0.6 <sup>ab</sup>	46.7±0.9 <sup>ab</sup>	46.6±0.7 <sup>ab</sup>	49.1±0.8 <sup>a</sup>
NTM 打草下一年两次氮	42.4±0.7 <sup>f</sup>	43.2±0.8 <sup>ef</sup>	42.9±0.8 <sup>f</sup>	45.6±0.6 <sup>d</sup>	45.8±0.6 <sup>d</sup>	45.3±0.9 <sup>de</sup>	48.4±0.6 <sup>bc</sup>	47.5±1.0 <sup>cd</sup>	50.0±0.6 <sup>ab</sup>	52.0±0.9 <sup>a</sup>
NMM 打草下每月一次氮	42.4±0.7 <sup>ef</sup>	41.5±1.0 <sup>f</sup>	44.6±0.9 <sup>de</sup>	45.6±0.7 <sup>cd</sup>	44.5±0.8 <sup>de</sup>	46.1±0.7 <sup>bcd</sup>	46.5±0.9 <sup>bcd</sup>	47.4±0.8 <sup>bcd</sup>	49.6±0.6 <sup>a</sup>	48.3±0.6 <sup>ab</sup>

实验处理详见图 1; 同一行中具有不同的上标字母表示差异显著 (P < 0.05)

表 3 羊草叶片叶绿素含量在不同处理间的比较  
Table 3 The T-test (P-values) of nitrogen deposition frequency (F), mowing (M) and among treatments on *L. chinensis* leaf chlorophyll content (SPAD value) along nitrogen gradient

处理 Treatment	氮 N (g·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )									
	0	1	2	3	5	10	15	20	50	
F 氮频率	0.331	0.716	0.810	0.166	0.370	0.066	0.526	0.385	0.009	
NTF/NTM 封育下一年两次氮与每月一次氮	0.883	0.522	0.798	0.519	0.557	0.402	0.460	0.306	0.486	
NTM/NMM 打草下一年两次氮与每月一次氮	0.203	0.175	0.928	0.211	0.517	0.111	0.890	0.654	<b>0.004</b>	
M 打草	0.840	0.216	0.038	0.913	0.539	0.732	0.711	< <b>0.001</b>	0.441	
NTF/NTM 封育和打草下一年两次氮	0.530	0.926	0.137	0.802	0.644	0.321	0.970	<b>0.006</b>	0.096	
NMF/NMM 封育和打草下每月一次氮	0.697	0.072	0.175	0.721	0.695	0.755	0.572	<b>0.003</b>	0.453	

实验处理详见图 1; 统计差异 P < 0.05 用粗体标记

$$y = 4.222x + 31.99 \quad (2)$$

式中, $y$  表示叶绿素含量, $x$  表示叶片氮浓度。

图 5 表示羊草植株的高度和该植株的叶片叶绿素含量的相关分析结果,其结果表明随着植株高度的增加羊草叶片叶绿素含量呈线性增加( $r=0.39, P<0.001$ )。

### 3 讨论

叶绿素是绿色植物进行光合作用不可缺少的组成部分,其含量的多少,直接影响到植物的光合作用,进而影响到植物在群落中的生态位和优势度<sup>[25]</sup>。SPAD-502plus 叶绿素仪通过二极管发射 660 nm 和 940 nm 的红光和近红光进行叶绿素 SPAD 值的测定,SPAD 值也称作绿色度,是一个无量纲的比值,是反应植物相对叶绿素含量的指标,同时对叶片没有损伤。李辉等<sup>[26]</sup>的研究表明,天然草原羊草叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量随叶绿素 SPAD 值的增加而增加,呈显著的线性相关函数关系,也就是说用 SPAD-502 叶绿素仪测定的叶绿素含量值可以代表叶片里浸提出来的叶绿素量。

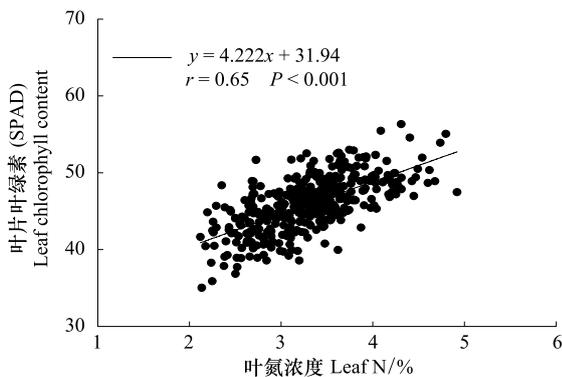


图 4 羊草叶片氮浓度与叶绿素含量的关系

Fig. 4 The relationship between *L. chinensis* leaf nitrogen concentration and leaf chlorophyll content

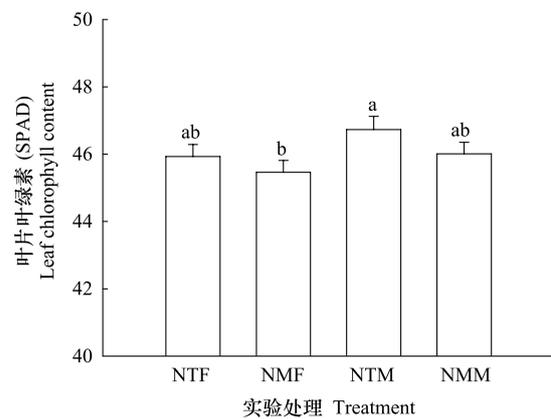


图 3 4 种处理下羊草叶绿素含量的单因素方差分析比较

Fig. 3 Results of one-way ANOVA on *L. chinensis* leaf chlorophyll content with treatments

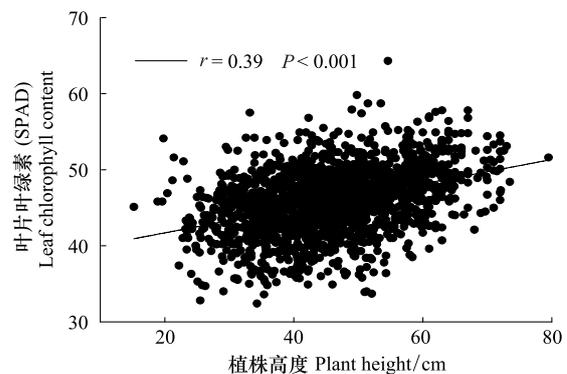


图 5 羊草植株高度与该株的叶片叶绿素含量的关系

Fig. 5 The relationship between plant height and *L. chinensis* leaf chlorophyll content

#### 3.1 氮沉降强度和频率与叶片叶绿素含量

氮沉降能直接增加植物可有效利用氮素,并供植物快速生长使用<sup>[27]</sup>。植物对氮的吸收利用与其生长物候直接相关,在植物的返青期、拔节期和灌浆期,植物需要较多的氮素,而在枯黄期,植物基本不需要外源氮素的供应<sup>[28]</sup>。同时羊草是多年生根茎禾草,其根茎可以储存丰富的营养供地上部分使用。氮沉降后,根茎迅速吸收可利用氮并储存于根茎。在内蒙古典型草原,羊草生长期从 4 月中旬到 8 月底,然后进入枯黄期<sup>[22,29]</sup>。实验地冬季(11 月到翌年 3 月)被雪覆盖,沉降的氮将在 3 月下旬到 4 月中旬随雪融化进入土壤供植物返青时提供充足的氮素<sup>[22,28]</sup>。

全年氮素有效性的差异与生长季内羊草在不同物候期对氮素的利用策略密切相连<sup>[28]</sup>。不同的氮沉降频率直接影响到不同物候期的氮素有效性;冬季的一次氮沉降或者多次氮沉降产生的氮素可能都被累积起来;生长季的一次氮输入(6 月)正好与羊草的拔节期重合,此时羊草利用根茎的优势快速储存氮素;而每月 1 次的氮输入,有近三分之一是在枯黄期(9 月和 10 月),植物不能有效的利用这一部分氮<sup>[19]</sup>;总体而言,低频率的氮沉降输入,有利于羊草储存更多的氮素供后期使用。由于叶绿素含量与植物氮含量显著正相关<sup>[17]</sup>,因此

低频率氮沉降下的叶绿素含量会高。

氮沉降增加草原优势植物(羊草)的叶片叶绿素含量,由于羊草植株高度也随氮沉降的增加而增高。植株高度的增加有利于羊草占据群落的更高层片,可以接收更充足的太阳光照。研究表明羊草叶片叶绿素含量的多少可以直接反应羊草的净光合速率<sup>[17]</sup>,因其叶片叶绿素含量与叶氮浓度的正相关关系(图4),叶片叶绿素含量的增加可以使羊草更充分地利用太阳光来合成碳水化合物<sup>[30]</sup>,并将这些化合物通过茎秆转移到地下根茎部分,供根茎生长和物质储存之用<sup>[31]</sup>。氮沉降下羊草高度与叶绿素含量之间的正相关关系,也说明氮沉降使羊草占据更有利的生态位<sup>[18]</sup>,增强了自身在群落中的优势地位。

### 3.2 草原管理与叶片叶绿素含量

打草和围栏封育均是当前草原的重要管理形式。通常认为,打草带走了部分氮后,植物氮含量会有所下降<sup>[21,32]</sup>,进而降低叶绿素含量。同时也有实验表明,割草虽然带走了部分营养元素,但是植物会激发自身对养分的吸收如氮、磷、钾等<sup>[33]</sup>。实验结果表明在氮沉降状况下,割草显著增加了羊草叶片叶绿素含量(表1,图3);羊草叶片叶绿素含量与其叶氮浓度的正相关关系(图4)也表明:割草管理有利于羊草叶氮浓度的增加。Pan等<sup>[34]</sup>研究表明施氮会显著增加羊草的优势度和重要值。割草亦会增加羊草的分蘖数,有利于后期的竞争<sup>[35-36]</sup>。羊草是多年生根茎禾草,本实验割草时期相对羊草物候期来说已经是生长末期,羊草已经把大部分氮素储存于根茎中,供冬季休眠和下一年的生长<sup>[19,28]</sup>。氮沉降下的割草管理提高羊草的优势度<sup>[36-37]</sup>,使大部分沉降的氮素又都被羊草截获供生长利用。羊草不仅可以利用更多的氮素同时还能获取更充足的资源(如光资源),从而促进草地生产力的提高<sup>[38]</sup>。

刈割(打草)会引起植物群落的密度下降,植株高度降低,凋落物减少,地表裸露度增加以及表层土壤水分蒸发加强<sup>[20]</sup>。同时割草使植物在生长发育中强化了从土壤中吸收营养元素(氮、磷、钾等)的功能,并向个体小型化方向演变,进而增加低层片植物的多度<sup>[33]</sup>。但在氮沉降下,土壤环境能提供较充足的有效氮供植物生长利用。割草管理下,施氮可以增加羊草群落中羊草的生物量,直接地表明了羊草的竞争优势<sup>[38]</sup>。生物量的增加亦可以说是碳水化合物的增加,而碳水化合物的来源是其光合作用的增加<sup>[30]</sup>。叶绿素含量的多少作为光合作用强度的一个重要指标,其对氮沉降的响应可以佐证其该物种的生物量变化<sup>[14]</sup>。因此氮沉降下打草有利于羊草叶片叶绿素含量的增加,有利于羊草的粗蛋白质质量的提升,有利于典型草原的可持续利用。

## 4 结论

氮沉降的增加会改变群落物种组成,进而改变种间和种内竞争关系,进一步影响到生态系统的结构和功能。羊草作为典型草原的优势物种,其在群落中其多度和生物量随氮沉降的增加而增加,叶片叶绿素含量作为植物的重要功能性状指标可以较好地指示其对氮沉降的响应。氮沉降显著增加羊草叶片的叶绿素含量。氮沉降频率对羊草叶片叶绿素含量产生重要影响,低频率氮沉降下叶绿素含量显著高于高频率氮沉降下的值;因此,低频率的氮素添加所得出的实验结果可能会夸大自然氮沉降的生态效应。在氮沉降增加的情形下,打草管理提高了羊草叶绿素含量,有利于提高羊草的光合作用和优势度,可促进打草场的更长期利用。虽然本文的结论仅是基于典型草原群落中的优势物种羊草的叶绿素这一个性状,并未从多性状、多物种以及群落水平探讨氮沉降对草地生态系统结构和功能的影响;但其结果首次揭示了模拟氮沉降频度(低频率和高频率)、氮沉降时间(生长季和非生长季)对内蒙古典型草原生态系统具有重要的影响,是模拟氮沉降研究的重要发展方向;未来亟需进一步加强该类研究,从而为揭示我国草地生态系统对氮沉降加剧的响应与适应机理。

**致谢:**感谢朱程,魏丽娟在野外测样的帮助,感谢中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站提供的气象数据和实验条件。

## References:

- [1] Clemo G R, Swan G A. The nitrogen cycle in nature. *Nature*, 1949, 164(4176): 811-813.
- [2] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, 2008, 89(2): 371-379.

- [ 3 ] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [ 4 ] Gruber N, Galloway J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, 2008, 451(7176): 293-296.
- [ 5 ] Liu X J, Duan L, Mo J M, Du E Z, Shen J L, Lu X K, Zhang Y, Zhou X B, He C E, Zhang F S. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2251-2264.
- [ 6 ] Lü C Q, Tian H Q, Liu M L, Ren W, Xu X F, Chen G S, Zhang C. Effect of nitrogen deposition on China's terrestrial carbon uptake in the context of multi-factor environmental changes. *Ecological Applications*, 2012, 22(1): 53-75.
- [ 7 ] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, Gundersen P, Fang Y T, Li D J, Wang H. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 2008, 14(2): 403-412.
- [ 8 ] Lu X K, Mo J M, Gilliam F S, Zhou G Y, Fang Y T. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in an old-growth tropical forest. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2688-2700.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] Yang H J, Jiang L, Li L H, Li A, Wu M Y, Wan S Q. Diversity-dependent stability under mowing and nutrient addition: evidence from a 7-year grassland experiment. *Ecology Letters*, 2012, 15(6): 619-626.
- [ 11 ] Zhou X B, Zhang Y M. Review on the ecological effects of N deposition in arid and semi-arid areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3835-3845.
- [ 12 ] Jiang S. The strategy of reasonable usage in grassland region - based on investigation at the area of BaiInXiLe, XiLin GoLe, Inner Mobjolia // *Research on Grassland Ecosystem*. Vol. 2 ed Academia Sinica Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station. Beijing: Science Press, 1988: 1-9.
- [ 13 ] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D22): D22S05.
- [ 14 ] Wu W H. *Plant Physiology*. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012.
- [ 15 ] Wang R Z, Huang W W, Chen L, Ma L N, Guo C Y, Liu X Q. Anatomical and physiological plasticity in *Leymus chinensis* (Poaceae) along large-scale longitudinal gradient in northeast China. *PLoS One*, 2011, 6(11): e26209.
- [ 16 ] Gough L, Osenberg C W, Gross K L, Collins S L. Fertilization effects on species density and primary productivity in herbaceous plant communities. *Oikos*, 2000, 89(3): 428-439.
- [ 17 ] Xiao S S, Dong Y S, Qi Y C, Peng Q, He Y T, Liu X C. Effects of mineral fertilizer addition on leaf functional traits and photosynthetic characteristics of *Leymus chinensis* from a temperate grassland in Inner Mongolia in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(12): 2535-2543.
- [ 18 ] Wan H W, Yang Y, Bai S Q, Xu Y H, Bai Y F. Variations in leaf functional traits of six species along a nitrogen addition gradient in *leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3): 611-621.
- [ 19 ] Du Z C, Yang Z G. The effect of cutting on the photosynthetic characteristics of *Aneurolepidium chinense*. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1989, 13(4): 317-324.
- [ 20 ] Zhong Y K, Sun W, Bao Q H. Effect of mowing on *Leymus chinensis* in typical steppe region. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol*, 1998, 29(2): 202-213.
- [ 21 ] Wang C H, Butterbach-Bahl K, Han Y, Wang Q B, Zhang L H, Han X G, Xing X R. The effects of biomass removal and N additions on microbial N transformations and biomass at different vegetation types in an old-field ecosystem in northern China. *Plant and Soil*, 2011, 340(1/2): 397-411.
- [ 22 ] Chen Z Z. Topography and climate of Xilin River Basin // *Research on Grassland Ecosystem*. Vol. 3 ed Academia Sinica Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station. Beijing: Science Press, 1988: 13-22.
- [ 23 ] Wang J W, Cai Y C. Studies on genesis, types and characteristics of the soils of the Xilin River Basin // *Research on Grassland Ecosystem*. Vol. 3 ed Academia Sinica Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station. Beijing: Science Press, 1988: 23-83.
- [ 24 ] Markwell J, Osterman J, Mitchell J. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, 1995, 46(3): 467-472.
- [ 25 ] Goedhart C M, Pataki D E, Billings S A. Seasonal variations in plant nitrogen relations and photosynthesis along a grassland to shrubland gradient in Owens Valley, California. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 213-223.
- [ 26 ] Li H, Bai D, Zhang Z, Guo P, Zhou C, Wu L. Correlation analysis between SPAD value and chlorophyll content of leaf of *Leymus chinensis*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(2): 27-30.
- [ 27 ] Vitousek P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. *The American Naturalist*, 1982, 119(4): 553-572.

- [28] Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1980, 11(1): 233-260.
- [29] Chen X Q, Li J. Relationships between *Leymus chinensis* phenology and meteorological factors in Inner Mongolia grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5280-5290.
- [30] Pan Q M, Bai Y F, Han X G, Zhang L X. Carbohydrate reserves in the rhizome of *Leymus chinensis* in response to nitrogen addition. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(1): 53-58.
- [31] Pan Q M, Bai Y F, Han X G, Yang J C. Effects of nitrogen additions on a *Leymus chinensis* population in typical steppe of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2005, 29(2): 311-317.
- [32] Laidlaw A S, Watson C J, Mayne C S. Implications of nitrogen fertilizer applications and extended grazing for the N economy of grassland. *Grass and Forage Science*, 2000, 55(1): 37-46.
- [33] Zhong Y K, Sun W, Sun W G. Influence of mowing on storing amount and distribution of nutrient elements in typical steppe ( III ) Influence of mowing on nutrient elements of content. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1999, 13(4): 69-73.
- [34] Pan Q M, Bai Y F, Wu J G, Han X G. Hierarchical plant responses and diversity loss after nitrogen addition: testing three functionally-based hypotheses in the Inner Mongolia grassland. *PLoS One*, 2011, 6(5): e20078.
- [35] Teng X, Ba L, Wang D L, Wang L, Liu J S. Growth responses of *Leymus chinensis* ( Trin. ) Tzvelev to sheep saliva after defoliation. *The Rangeland Journal*, 2010, 32(4): 419-426.
- [36] Zhang C H, Yang Y F, Li J D. Studies on vegetative propagation of *aneurolepidium chinense* populations in different interference conditions. *Pratacultural Science*, 1995, 12(6): 61-62, 67-67.
- [37] Sasaki T, Yoshihara Y, Suyama Y, Nakashizuka T. Clipping stimulates productivity but not diversity in improved and semi-natural pastures in temperate Japan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 142(3/4): 428-431.
- [38] Li J X, Sun G R, Li J, Suo S X, Ma Y, Kang B Z, Xing Y L. The studies on the spraying fertilizer upon leaves of *Leymus chinense* on cutting grassland. *Grassland of China*, 1993, (3): 15-19.

#### 参考文献:

- [11] 周晓兵, 张元明. 干旱半干旱区氮沉降生态效应研究进展. *生态学报*, 2009, 29(7): 3835-3845.
- [12] 姜恕. 关于草原合理利用策略的探讨——以内蒙古锡林郭勒盟中部白音锡勒地区为例 // 中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站编. *草原生态系统研究(第2集)*. 北京: 科学出版社, 1988: 1-9.
- [14] 武维华. *植物生理学(第2版)*. 北京: 科学出版社, 2012.
- [17] 肖胜生, 董云社, 齐玉春, 彭琴, 何亚婷, 刘欣超. 内蒙古温带草原羊草叶片功能特性与光合特征对外源氮输入的响应. *环境科学学报*, 2010, 30(12): 2535-2543.
- [18] 万宏伟, 杨阳, 白世勤, 徐云虎, 白永飞. 羊草草原群落6种植物叶片功能特性对氮素添加的响应. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 611-621.
- [19] 杜占池, 杨宗贵. 刈割对羊草光合特性影响的研究. *植物生态学与地植物学学报*, 1989, 13(4): 317-324.
- [20] 仲延凯, 孙维, 包青海. 刈割对典型草原地带羊草(*Leymus chinensis*)的影响. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 1998, 29(2): 202-213.
- [22] 陈佐忠. 锡林河流域地形与气候概况 // 中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站编. *草原生态系统研究(第3集)*. 北京: 科学出版社, 1988: 13-22.
- [23] 汪久文, 蔡蔚祺. 锡林河流域土壤的发生类型及其性质的研究 // 中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站编. *草原生态系统研究(第3集)*. 北京: 科学出版社, 1988: 23-83.
- [26] 李辉, 白丹, 张卓, 郭平, 周婵, 乌兰. 羊草叶片 SPAD 值与叶绿素含量的相关分析. *中国农学通报*, 2012, 28(2): 27-30.
- [29] 陈效述, 李惊. 内蒙古草原羊草物候与气象因子的关系. *生态学报*, 2009, 29(10): 5280-5290.
- [30] 潘庆民, 白永飞, 韩兴国, 张丽霞. 羊草根茎的贮藏碳水化合物及对氮素添加的响应. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 53-58.
- [31] 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.
- [33] 仲延凯, 孙维, 孙卫国. 割草对典型草原植物营养元素贮量及分配的影响( III )刈割对植物营养元素含量变化的影响. *干旱区资源与环境*, 1999, 13(4): 69-73.
- [36] 张春华, 杨允菲, 李建东. 不同干扰条件下羊草种群营养繁殖的研究. *草业科学*, 1995, 12(6): 61-62, 67-67.
- [38] 李景信, 孙荣国, 李晶, 所胜昔, 马义, 康宝忠, 邢玉龙. 割草地羊草叶面施肥的初步研究. *中国草地*, 1993, (3): 15-19.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.21 Nov., 2013 (Semimonthly)**  
**CONTENTS**

**Frontiers and Comprehensive Review**

- Gross ecosystem product: theory framework and case study ..... OUYANG Zhiyun, ZHU Chunquan, YANG Guangbin, et al (6747)
- Advances in impacts of climate change on infectious diseases outbreak ..... LI Guodong, ZHANG Junhua, JIAO Gengjun, et al (6762)
- Ecology of aerobic methane oxidizing bacteria (methanotrophs) ..... YUN Juanli, WANG Yanfen, ZHANG Hongxun (6774)
- Nitrogen deposition and *Leymus chinensis* leaf chlorophyll content in Inner Mongolian grassland .....  
..... ZHANG Yunhai, HE Nianpeng, ZHANG Guangming, et al (6786)
- Worldwide distribution and multivariate similarity clustering analysis of spiders .....  
..... SHEN Xiaocheng, ZHANG Baoshi, ZHANG Feng, et al (6795)
- The influence of wind direction on pollen-mediated gene flow in transgenic insect-resistant cotton .....  
..... ZHU Jialin, HE Juan, NIU Jianqun, et al (6803)

**Autecology & Fundamentals**

- Ecological characteristics of benthic diatoms, protozoa and meiobenthos in the sediments of the Changjiang Estuary and East China  
Sea in spring ..... MENG Zhaoctui, XU Kuidong (6813)
- Macrobenthic functional groups at the reclamation and natural tidal flats of Hengsha East Shoal, the Estuary of Changjiang River .....  
..... LV Weiwei, MA Chang'an, YU Ji, et al (6825)
- Enrichment and ecological risk of heavy metal in soils and dominant plants in the riparian of the Fenghe River .....  
..... YANG Yang, ZHOU Zhengchao, WANG Huanhuan, et al (6834)
- Effects of salinity and exogenous substrates on the decomposition and transformation of soil organic carbon in the Yellow River  
Delta ..... LI Ling, QIU Shaojun, TAN Feifei, et al (6844)
- Effects of short-term dark chilling on leaves carbon and nitrogen metabolism and involved activities of enzymes in mangrove *Kandelia  
obovata* seedling ..... ZHENG Chunfang, LIU Weicheng, CHEN Shaobo, et al (6853)
- Preliminary evaluation on tolerance to phosphorous deficiency of 32 cultivars of cut chrysanthemum .....  
..... LIU Peng, CHEN Sumei, FANG Weimin, et al (6863)
- Effects of age and environmental conditions on accumulation of heavy-metals Cd and Cu in *Tegillarca granosa* .....  
..... WANG Zhaogen, WU Hongxi, CHEN Xiaoxiao, et al (6869)
- Effects of Chinese gallnut on photosynthetic characteristics and total nitrogen content of *Rhus chinensis* .....  
..... LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (6876)
- The characterization of glyphosate degradation by *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 ..... LI Guanxi, WU Xiaoqin, YE Jianren (6885)
- Electroantennographic and behavioural responses of scarab beetles to *Ricinus communis* leaf volatiles .....  
..... LI Weizheng, YANG Lei, SHEN Xiaowei, et al (6895)

**Population, Community and Ecosystem**

- Ecosystem health assessment in Baiyangdian Lake ..... XU Fei, ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng, et al (6904)
- Characteristics of macrobenthic communities in mangrove wetlands along the waterways of North Hezhou, Zhuhai, South China .....  
..... WANG Hui, ZHONG Shan, FANG Zhanqiang (6913)
- The interaction between components of ecosystem respiration in typical forest and grassland ecosystems .....  
..... ZHU Xianjin, YU Guirui, WANG Qiufeng, et al (6925)
- Effects of thinning on macro fungi and their relationship with litter decomposition in *Pinus tabulaeformis* plantations .....  
..... CHEN Xiao, BAI Shulan, LIU Yong, et al (6935)

- Beta diversity of plant communities in Baishanzu Nature Reserve ..... TAN Shanshan, YE Zhenlin, YUAN Liubin, et al (6944)
- Effect of Oxytetracycline (OTC) on the activities of enzyme and microbial community metabolic profiles in composting .....  
 ..... CHEN Zhixue, GU Jie, GAO Hua, et al (6957)

### **Landscape, Regional and Global Ecology**

- Variations in leaf anatomy of *Larix gmelinii* reflect adaptation of its photosynthetic capacity to climate changes .....  
 ..... JI Zijiang, QUAN Xiankui, WANG Chuankuan (6967)
- The studying of key ecological factors and threshold of landscape evolution in Yancheng Coastal wetland .....  
 ..... ZHANG Huabing, LIU Hongyu, LI Yufeng, et al (6975)
- Eco-physiological response of *Phragmites communis* to water table changes in the Horqin Sand Land .....  
 ..... MA Yunhua, ZHANG Tonghui, LIU Xinping (6984)
- Improvement of snowmelt implementation in the SWAT hydrologic model ... YU Wenjun, NAN Zhuotong, ZHAO Yanbo, et al (6992)
- Responses of lake fluctuation to climate change in Horqin Sandy Land .....  
 ..... CHANG Xueli, ZHAO Xueyong, WANG Wei, et al (7002)
- Water ecology and fractal characteristics of soil particle size distribution of three typical vegetations in Shell Island .....  
 ..... XIA Jiangbao, ZHANG Shuyong, WANG Rongrong, et al (7013)
- Spatio-temporal distribution of epilithic algal chlorophyll a in relation to the physico-chemical factors of Gufu River in Three Gorges Reservoir .....  
 ..... WU Shuyuan, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (7023)

### **Resource and Industrial Ecology**

- Graphic analysis of spatio-temporal effect for vegetation disturbance caused by coal mining: a case of Datong Coal Mine Area .....  
 ..... HUANG Yi, WANG Yunjia, LI Xiaoshun, et al (7035)

# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 余新晓

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 21 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 21 (November, 2013)

**编 辑** 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**主 编** 王如松

**主 管** 中国科学技术协会

**主 办** 中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

**出 版** 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

**印 刷** 北京北林印刷厂

**发 行** 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

**订 购** 全国各地邮局

**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京 399 信箱  
邮政编码:100044

**广告经营** 京海工商广字第 8013 号  
**许 可 证**

**Edited** by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel: (010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**Editor-in-chief** WANG Rusong

**Supervised** by China Association for Science and Technology

**Sponsored** by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

**Published** by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

**Printed** by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

**Distributed** by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel: (010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

**Domestic** All Local Post Offices in China

**Foreign** China International Book Trading  
Corporation  
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元