

基于高分和哨兵卫星影像研究氮沉降对杨树人工林的影响

王浩斌¹ 濮毅涵¹ 徐丹丹^{1,2*}

(¹南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037; ²南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

摘要 氮沉降会对生态系统产生多方面的影响, 而现有的森林生态系统对氮沉降的响应研究主要集中在短期的即时性影响上, 因此迫切需要关注氮沉降对森林生态系统的长期影响。为了解不同氮沉降水平对杨树人工林在长时间序列上的影响, 从2012年开始, 在起始林龄为8年的杨树(*Populus deltoides*)人工林开展连续7年的模拟氮沉降试验, 氮添加水平分别为空白对照($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、低氮处理(N1, $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、中氮处理(N2, $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、高氮处理(N3, $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)和超高氮处理(N4, $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。通过高分(GF1、GF2)和哨兵(Sentinel-2)高空间分辨率卫星遥感手段提取杨树NDVI值并分析其动态变化, 研究不同氮沉降水平在长时间序列上对杨树人工林生长的影响。结果表明: 经过2年的模拟氮沉降, 4个氮添加样地杨树NDVI值分别增加2.0%、4.8%、4.3%和4.5%, 均达到了最大增长率; 经过4年的模拟氮沉降, 各氮添加处理的杨树NDVI值均大于对照, 表现为对杨树生长具有促进作用, 但这种促进作用在第3年后是整体减弱的; 经过6年的模拟氮沉降, 中低氮处理仍然对杨树表现为促进作用, 而高氮和超高氮处理则对杨树表现为抑制作用, 且随着氮添加水平的增高, 这种促进作用逐渐减弱而抑制作用逐渐增强。

关键词 氮沉降; 杨树人工林; 高分影像; 哨兵2影像; 归一化植被指数

Assessing the impacts of nitrogen deposition on poplar plantation based on Gaofen and Sentinel imagery. WANG Hao-bin¹, PU Yi-han¹, XU Dan-dan^{1,2*} (¹College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; ²Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China).

Abstract: Nitrogen deposition has multiple effects on forest ecosystems. Previous related studies mainly focused on immediate effects in the short term. It is critically needed to study long-term impacts of nitrogen deposition on forest ecosystems. To understand the effects of nitrogen deposition with different levels on forest ecosystem, a simulated nitrogen deposition experiment was conducted in a 8-year-old poplar (*Populus deltoides*) plantation since 2012, with the treatments of CK ($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), low nitrogen deposition (N1, $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), medium nitrogen deposition (N2, $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), high nitrogen deposition (N3, $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), and ultrahigh nitrogen deposition (N4, $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$). The effects of nitrogen addition on the growth of poplar plantation over long time series was examined using Gaofen (GF1, GF2) and Sentinel (Sentinel-2) satellite images by extracting poplar NDVI values. The results showed that the NDVI values of poplar trees were increased by 2.0%, 4.8%, 4.3%, and 4.5% in the four N treatments, respectively. The maximum growth rate occurred after treated for two years. After four years of treatment, the NDVI values of poplar trees under nitrogen addition were all greater than that of the CK, which indicated that nitrogen deposition had positive effects on poplar growth. However, such promotion effects were overall weakened after three years. After being

国家自然科学基金项目(41901361)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20180769)、江苏省“六大人才高峰”创新人才团队项目(TD-XYDXX-006)和江苏省高校自然科学研究面上项目(18KJB180009)资助。

收稿日期: 2020-10-29 接受日期: 2021-04-06

* 通讯作者 E-mail: dandan.xu@njfu.edu.cn

treated for six years, medium and low nitrogen deposition had a promoting effect on poplar growth, but high and ultrahigh nitrogen treatment had an inhibiting effect. Overall, the promoting effect was gradually weakened while the inhibiting effect was gradually enhanced with increasing nitrogen addition levels.

Key words: nitrogen deposition; poplar plantation; Gaofen imagery; Sentinel-2 imagery; NDVI.

中国是森林资源大国,根据第七次全国森林资源清查,我国森林覆盖率为20.36%,全国森林面积为 $1.95 \times 10^8 \text{ hm}^2$,其中人工林面积占比达到31.79%,人工林面积位居首位(国家林业局森林资源管理司,2010)。森林生态系统作为维护地球生态平衡的重要力量,同时也是氮沉降的主要承受对象(邓浩俊等,2015)。近年来,随着化学燃料的燃烧、农业氮肥的使用以及畜牧业的发展等人类活动的影响,全球氮沉降量在过去的—个世纪中已经增加了3~5倍(根据IPCC第4次报告),中国从1980年到2000年短短20年间,氮沉降量增加了约 $8 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,达到了 $21.1 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,成为全球仅次于欧美地区的第三大氮沉降地区(IPCC,2007;Liu *et al.*,2013),氮沉降严重影响了生态系统的健康,在多个方面都会对森林生态系统造成影响,不仅仅改变森林生态系统中的氮循环,而且通过改变土壤酶活性、土壤动物密度和群落多样性以及影响森林生态系统中凋落物的分解速度,从而影响森林生态系统的碳循环(Chen *et al.*,2002;周丹燕等,2015;马鹏宇等,2019;王万才等,2019),显著影响生态系统的结构和功能,威胁生态系统的动态平衡和可持续发展(鲁显楷等,2019)。

不同水平大气氮沉降对树木生长的影响不同。方运霆等(2005)在鼎湖山通过施加 NH_4NO_3 溶液的形式对马尾松进行1年的模拟氮沉降试验,结果发现,低氮处理($50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)对其胸径生长没有产生明显影响,但中氮处理($100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)使其增加了77.8%;樊后保等(2007)进行3年的模拟氮沉降试验也得到类似结果,低氮处理($60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)对杉木胸径也没有产生影响,中高氮处理($120、240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)则明显促进了杉木胸径的增加;王睿照等(2020)通过喷洒 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NaNO_3 溶液的形式对长白落叶松人工林进行5年的模拟氮沉降试验,结果表明硝态和氨态氮添加($20、40、80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)对落叶松人工林的生长均具有抑制作用;而黄玉梓等(2009)以定期喷洒尿素($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)溶液的形式对12年生杉木人工林进

行长达5年的模拟氮沉降试验,结果显示,低氮处理($60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)促进了杉木的生长,中高氮处理($120、240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)则在一定程度上对杉木具有抑制性。这些差异和不一致性说明了氮沉降对树木的生长存在一定的影响,不同水平氮沉降对于树木具有不同的影响。

氮沉降对于树木的生长可能具有滞后性影响(效应)。研究表明,对杉木人工林进行模拟氮沉降实验,氮沉降初期(3年内),氮沉降促进了林木胸径的增长,但随着氮沉降时间的延长(至5年),这种促进作用慢慢减弱(黄玉梓等,2009),这可能是因为氮滞留的原因(Aber *et al.*,1998)。然而,Kjonaas等(1998)在瑞典针叶林中开展的氮沉降实验表明,连续5年的氮添加并未改变树木的生长速度。关于这方面的研究存在不一致性,氮沉降对森林生长的滞后性影响规律在现有的研究中也未得到详细阐述,因此需要进一步开展长期研究。

研究氮沉降对生态系统的影响主要是根据生态系统的反馈,而生态系统对氮沉降的反馈主要是通过生态系统中的生物物理参数的变化来反映的,这些生物物理参数包括生物量、森林蓄积量、叶面积指数、叶片叶绿素、生物多样性等(鲁显楷等,2008;李德仁等,2012;许凯等,2014;裴昊斐等,2019)。遥感作为一种能在大尺度和长时间序列上有效获取和记录植被动态变化的技术手段(Nagendra,2001;Kerr *et al.*,2003),在反演生态系统中的生物物理参数以及这些参数的动态变化很有优势(何兴元等,2018),其中归一化植被指数(NDVI)就能很好地反映绿色植物的生长状况。通过卫星遥感影像提取绿色植物的NDVI,并对NDVI在时间序列上的变化进行分析,能够得出植被分布区域的变化规律(张珊,2019;李万钰等,2020)。通过获取长期一致且稳定的卫星遥感影像数据,不仅能反映氮沉降对杨树人工林的即时性影响,也能展现其滞后性规律。

本研究以我国大面积种植的杨树人工林为研究对象,利用自2012年建立的东台林场模拟氮沉降实验样地,通过卫星遥感的方法,研究不同氮沉降水平

处理对杨树人工林产生的影响,以期在全球氮沉降日益严重的背景下为合理的人工林保育策略提供一定的科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于江苏省盐城市境内的东台林场(图1),其地理位置为120.49°E,32.52°N,有明显的过渡性海洋性和季风性气候,四季分明,雨量集中,年平均气温为14.6℃,每年的无霜期为220 d,降雨量为1051.0 mm,年平均日照为2169.6 h,林场地势平坦,土壤类型为脱盐草甸土,土壤质地为砂质土壤,土壤pH值为8.0左右(王国兵等,2019)。

1.2 试验设计

本研究在已有的盐城市境内东台林场模拟氮沉降样地中进行(图1),从2012年4月开始,通过人工施氮的方式进行模拟氮沉降。在立地条件及经营方式相同的8林龄黑杨派无性系I-35杨(*Populus deltoides* cv. 'I-35')人工林中建立起造林株距5 m×6 m、平均树高26.26 m、平均胸径23.12 cm的4块氮沉降大样地(每块大小为30 m×165 m),采用随机区组设计,每块大样地中设置5块小样地,包括1个对照小样地和4个不同水平的氮沉降小样地(大小皆

为30 m×25 m),分别为空白对照(N0,0 kg·hm⁻²·a⁻¹)、低氮处理(N1,50 kg·hm⁻²·a⁻¹)、中氮处理(N2,100 kg·hm⁻²·a⁻¹)、高氮处理(N3,150 kg·hm⁻²·a⁻¹)、超高氮处理(N4,300 kg·hm⁻²·a⁻¹),每个样地之间保留10 m宽的缓冲带(许凯等,2014)。

试验样地从2012年4月开始,在每年植物生长最大季(5—10月)通过NH₄NO₃按不同施氮量,以每月1次的频率进行外源施加氮素,为了获得更好的肥效,施加氮素的过程中,将不同水平的NH₄NO₃溶解于20 L水中,均匀喷洒入相应的样地中,同时,在对照样地中喷洒20 L水以减少不同处理之间的差异。

1.3 影像数据与处理

数据分别来源于中国资源卫星应用中心及美国地质调查局(USGS):东台2013—2016年高分卫星影像(其中2013—2014年为GF1,2015—2016年为GF2)和2018年Sentinel-2卫星影像,其中GF影像使用ENVI 5.3软件进行辐射定标、Flaash模型大气校正和正射校正,后以重采样为相同分辨率的谷歌地球无偏移卫星影像为基准,对GF影像进行地面控制点(Ground Control Points,GCPs)配准;Sentinel-2影像使用SNAP软件(由欧洲航天局开发的专门处

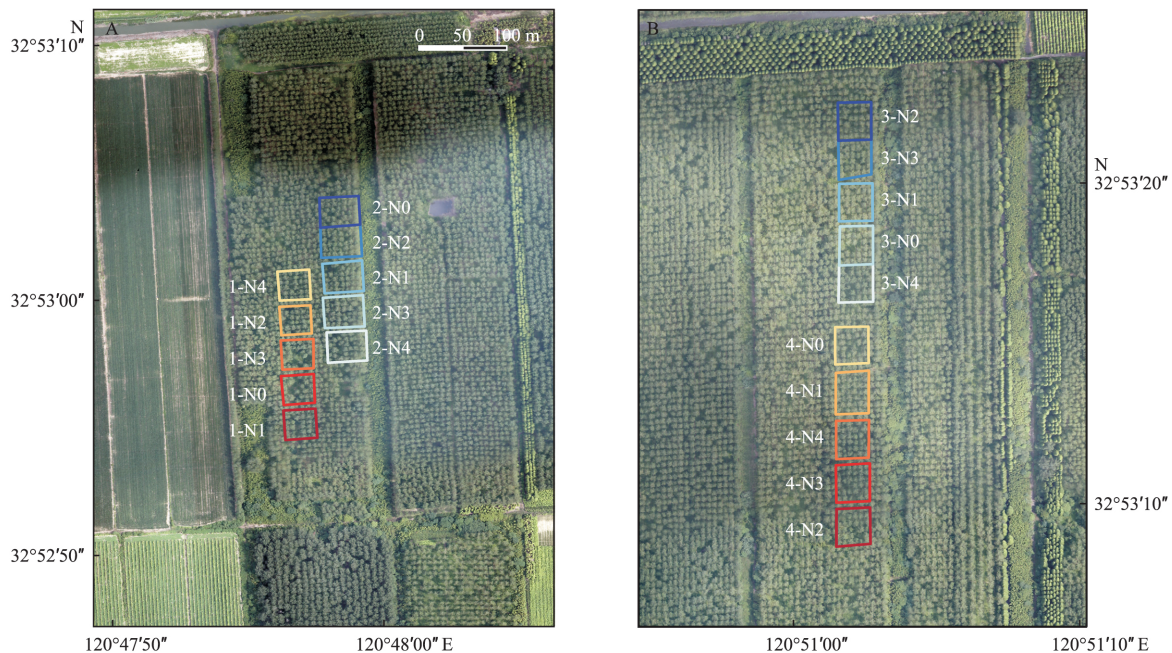


图1 江苏省盐城市东台林场氮沉降样地设计

Fig.1 Sample design of nitrogen deposition in Dongtai Forest Farm, Yancheng City, Jiangsu Province

注: A为1、2号样地, B为3、4号样地,背景影像为无人机RGB影像,获取时间为2015年夏季,分辨率为0.15 m。

Note: A is No. 1 and No. 2 test site, B is No. 3 and No. 4 test site. The background image is RGB image of UAV, acquired in the summer of 2015, with a spatial resolution of 0.15 m.

理 Sentinel 系列影像的软件)的 Sen2cor 进行大气校正,并提取出红波段和近红外波段的光谱反射率值,计算归一化植被指数 NDVI(公式 1)。利用绿色植物叶片在红波段和近红外波段的光谱反差计算的 NDVI 值,可以反映出植被的生长变化信息(甄晓菊等 2019)。同时,计算比值植被指数(RVI)、绿色归一化植被指数(GNDVI)和优化的比值植被指数(MSR)对 NDVI 结果进行验证(公式 2—4)。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

$$RVI = NIR / R \quad (2)$$

$$GNDVI = (NIR - G) / (NIR + G) \quad (3)$$

$$MSR = \left(\frac{NIR}{R} - 1 \right) / \sqrt{\left(\frac{NIR}{R} + 1 \right)} \quad (4)$$

式中: *NIR* 代表近红外波段的反射率(Sentinel-2 影像第八波段、GF 影像第四波段的地表反射率); *R* 代表红波段的反射率(Sentinel-2 影像第四波段、GF 影像第三波段的地表反射率); *G* 代表绿波段的反射率(Sentinel-2 影像第三波段、GF 影像第二波段的地表反射率)

1.4 单因素方差分析

方差分析(ANOVA)用于两个及两个以上样本

均数差别的显著性检验,研究一个控制变量的不同水平(单个因素)是否对观测变量产生显著影响称为单因素方差分析(One-way ANOVA)。在本研究中,控制变量为氮添加,观测变量为杨树的 NDVI 值,通过单因素方差分析,可以确定不同的氮添加水平对杨树 NDVI 值的影响程度,以及每个氮添加水平之间是否有显著的区别,以达到研究杨树生长过程中如何响应不同水平氮沉降的目的。方差分析在 SPSS(版本 20.0)中完成。

2 结果与分析

模拟氮沉降试验持续一年后(图 2A),各处理均使得杨树的 NDVI 值增加,且除 N3 与 N4 处理外,其他处理相互之间均具有显著性差异($P < 0.05$),随着氮添加水平的提高,NDVI 增长率分别为 0.5%、2.1%、2.2%和 2.7%;进行模拟氮沉降的第 3 年(图 2B)相比于空白对照处理,各氮添加处理也均使得 NDVI 值增加,除 N2、N3 和 N4 处理外,其他处理相互之间均具有显著性差异($P < 0.001$)。相对于空白对照组,各氮添加处理增长率分别为 2.0%、4.8%、4.3%和 4.5%;随着模拟氮沉降的进行,到 2015 年

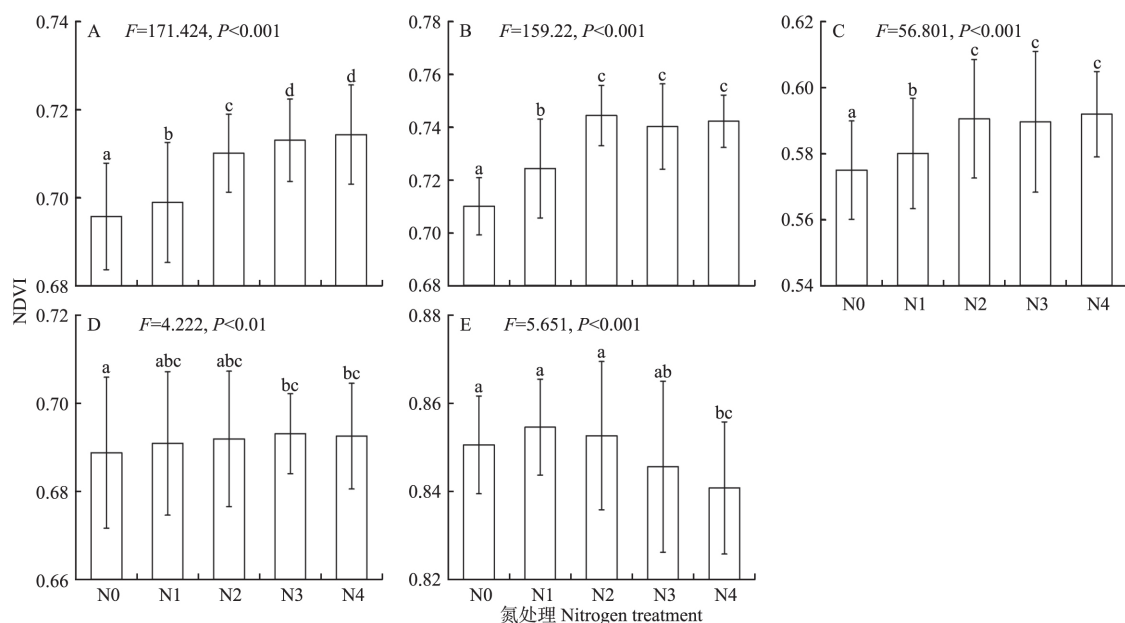


图 2 氮添加对东台林场杨树人工林 NDVI 的影响

Fig.2 Influence of nitrogen addition on NDVI of poplar plantation in Dongtai Forest Farm

注: 数值为平均值±标准差; 2A-2E 分别为 2013 年 8 月 13 日 GF1 PMS1 观测结果, 2014 年 7 月 21 日 GF1 PMS2 观测结果, 2015 年 6 月 14 日 GF2 PMS2 观测结果, 2016 年 7 月 27 日 GF2 PMS2 观测结果, 2018 年 7 月 13 日 Sentinel-2 MSI 观测结果; 不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$), 相同及含有相同小写字母表示处理间差异不显著($P > 0.05$)。N0、N1、N2、N3、N4 分别表示氮添加量 0、50、100、150、300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

Note: Data represented as Mean±SD. 2A-2E are the observation results of GF1 PMS1 on August 13, 2013, GF1 PMS2 on July 21, 2014, GF2 PMS2 on June 14, 2015, GF2 PMS2 on July 27, 2016, and Sentinel-2 MSI observation on July 13, 2018. Different lowercase letters indicated significant difference among treatments ($P < 0.05$), the same and the presence of the same lowercase letters indicated that the differences between treatments are not significant ($P > 0.05$). N0, N1, N2, N3, and N4 denote nitrogen additions of 0, 50, 100, 150, and 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

(图 2C), 氮添加处理仍然使得杨树的 NDVI 值增高, 且除 N2、N3 和 N4 处理外, 其他处理相互之间均具有显著性差异 ($P < 0.001$), 各氮添加处理后 NDVI 值的增长率分别为 0.9%、2.7%、2.5% 和 2.9%; 通过 4 年的模拟氮沉降, 至 2016 年(图 2D), 各氮添加处理仍然使杨树的 NDVI 值增加, 但仅 N3、N4 处理与 N0 在统计学上具有显著性差异 ($P < 0.05$), 各氮添加处理后相对于空白对照 NDVI 值的增长率为 0.3%、0.5%、0.6%、0.6%; 到 2018 年(图 2E), 通过 6 年的模拟氮沉降, N1 和 N2 处理使得杨树的 NDVI 值增高, N3 处理降低、N4 处理显著降低杨树的 NDVI 值, 开始抑制杨树的生长, 各处理后 NDVI 值的增加率分别为 0.5%、0.3%、-0.6% 和 -1.2%。

采用计算比值植被指数(RVI)、绿色归一化植被指数(GNDVI)和优化的比值植被指数(MSR)对结果进行验证, 结果显示经过一年的模拟氮沉降试验(图 3A1、B1 和 C1), 各处理使得 RVI、GNDVI 和 MSR 值均增加, 其中 RVI 和 MSR 值除 N3 和 N4 处理、GNDVI 除 N1 和 N0 处理外, 其余处理之间均具有显著性差异 ($P < 0.01$); 至 2014 年(图 3A2、B2 和 C2), 各处理均使得 RVI、GNDVI 和 MSR 值增加, 其中除 RVI 与 MSR 值中的 N2 与 N4、N3 与 N4 处理, GNDVI 中的 N2、N3 和 N4 处理外, 其余组间均具有显著性差异 ($P < 0.01$); 随着试验进行, 到 2015 年(图 3A3、B3 和 C3), 结果显示各处理仍然使得 RVI、GNDVI 和 MSR 值增加, 且除 N2、N3 和 N4 处理外, 其余处理均具有显著性差异 ($P < 0.01$); 2016 年(图 3A4、B4 和 C4), 结果显示各处理使得 RVI、GNDVI 和 MSR 值增加, 且 N4 均相对于 N3 处理出现值的下降, RVI 与 MSR 均仅 N0 与其他处理间有显著性差异 ($P < 0.05$), GNDVI 中 N2 与 N1 无显著差异 ($P > 0.05$), N2 与 N3、N4 无显著差异 ($P > 0.05$); 到 2018 年(图 3A5、B5 和 C5), RVI、GNDVI 与 MSR 结果均显示 N1 和 N2 处理使得值上升而 N3 和 N4 处理使得值下降, 但 GNDVI 各处理间均无显著性差异 ($P > 0.05$), RVI 仅 N1、N2 与 N4 有显著性差异 ($P < 0.01$), MSR 仅 N4 处理与 N0、N1 和 N2 有显著性差异 ($P < 0.01$)。

结果显示, RVI、GNDVI、MSR 与 NDVI 趋势一致, 以上分析表明在氮沉降初期无论是低氮处理还是超高氮处理, 均会促进杨树生长, 且随着氮添加水平的增加, 其促进作用越强(图 2A); 经过 2 年的氮添加处理, 各处理对杨树的促进作用达到了顶峰

(图 4), 之后的 2 年氮添加处理, 尽管促进作用逐渐减弱, 但各水平的氮添加处理仍然促进杨树生长; 直到进行氮添加的第 7 年, 即 2018 年, 除中低水平氮添加还在促进杨树生长外, 高水平及超高水平已经抑制杨树生长, 且这种促进作用随着氮添加水平增加而减弱, 抑制作用随着氮添加水平增加而增强。

3 讨论

3.1 归一化植被指数

归一化植被指数(NDVI)能够区分绿色植被信息和土壤背景信息, 反映植物生长状态和空间分布密度之间的关系, 与空间分布密度之间具有线性正相关性(冯露等, 2009), 其值的变化幅度在 $-1 \sim 1$, 其中 0 和负值代表无植被覆盖的表面(李喆等, 2015)。NDVI 值在时间序列上会随着植物生长产生有规律的季节性变动, 但由于本研究中分别使用了 4 种不同的卫星传感器(GF1 PMS1、GF1 PMS2、GF2 PMS2、Sentinel-2 MSI)数据, 传感器和采集月份的不同导致数据标准不一, 因此杨树人工林年际间的变化采用了相对空白对照处理(N0)的增长率(图 4)来说明。同时, 采用计算比值植被指数(RVI)、绿色归一化植被指数(GNDVI)和优化的比值植被指数(MSR)的方法对 NDVI 结果进行验证, 其结果规律一致, 综合来看, 归一化植被指数(NDVI)反演结果较好。受不同卫星在轨时间、过境时间、精度、分辨率、稳定性及参数设定等因素的影响, 长时间序列上定量遥感反演的应用和发展被严重限制(葛美香等, 2017), 多源传感器之间数据同化的问题仍然存在, 需要解决。

3.2 氮添加对杨树人工林的影响

氮素是植物生长最主要的限制元素, 外加氮素增加了土壤的含氮量, 使植物体内氮量增加, 从而影响植物的生长发育(Berger *et al.*, 2001), 氮沉降对植物起促进作用还是抑制作用取决于这些植物所在的生态系统的氮素饱和度, 当生态系统未达到氮素饱和度, 即植物生长受氮元素限制时, 短期的氮添加会促进植物生长, 典型的例子就是农业上施用氮肥促进植物生长(李德军等, 2003)。

本研究结果与前人研究结果均有不同, 同样经过 5 年时间的模拟氮沉降, 120 、 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 水平的氮添加已经抑制了杉木人工林的生长(黄玉梓等, 2009), 氮添加对落叶松人工林的生长具有反作用(王睿照等, 2020), 而本研究的结果表明持续 5 年

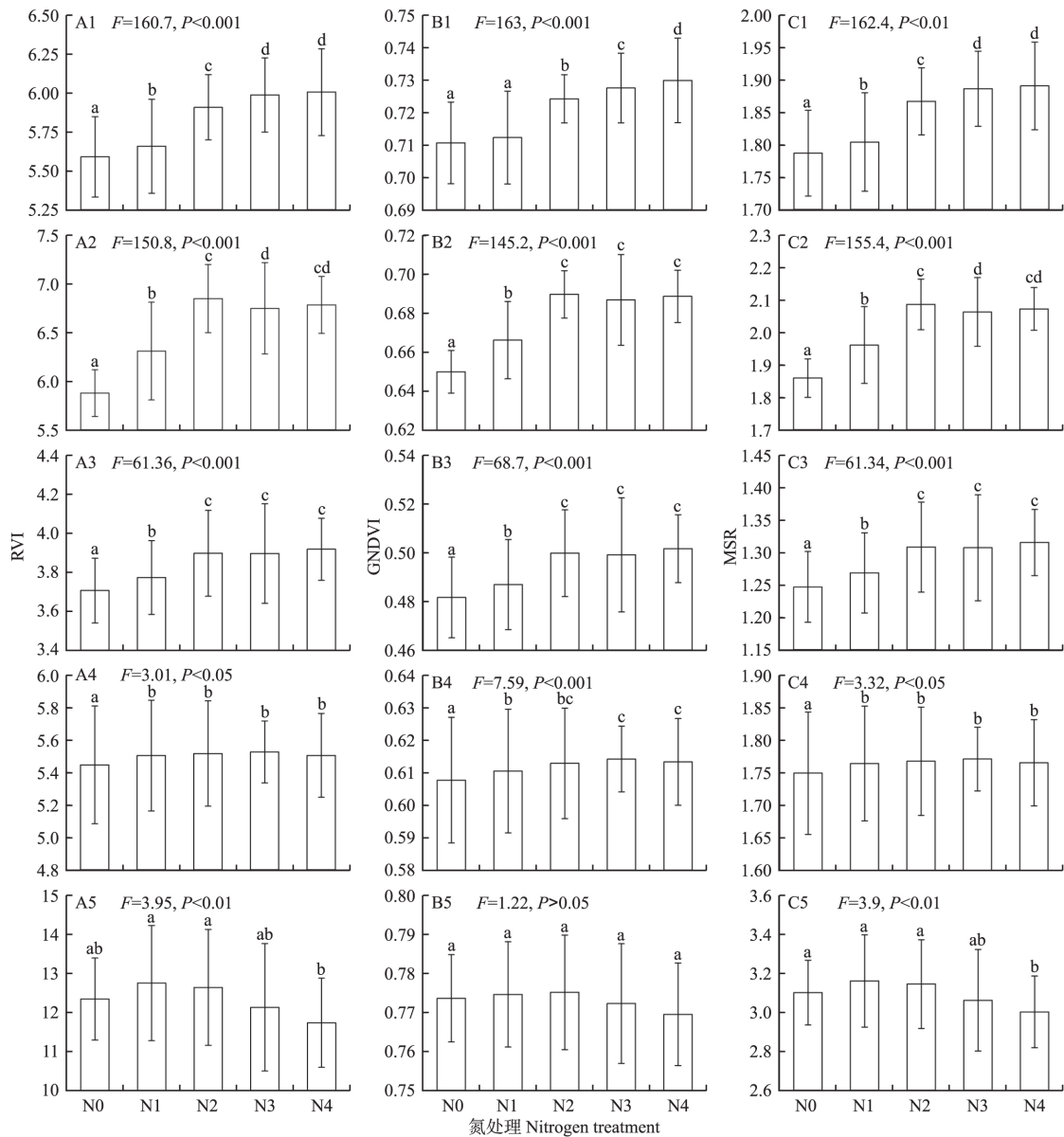


图3 氮添加对东台林场杨树人工林 RVI、GNDVI 及 MSR 的影响

Fig.3 Influence of nitrogen addition on RVI, GNDVI and MSR of poplar plantation in Dongtai Forest Farm

注: 数值为平均值±标准差; A、B、C 为杨树人工林 RVI、GNDVI 和 MSR 值对氮添加的响应; 1-5 分别为 2013 年 8 月 13 日 GF1 PMS1 观测结果, 2014 年 7 月 21 日 GF1 PMS2 观测结果 2015 年 6 月 14 日 GF2 PMS2 观测结果 2016 年 7 月 27 日 GF2 PMS2 观测结果 2018 年 7 月 13 日 Sentinel-2 MSI 观测结果; 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) 相同及含有相同小写字母表示处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。N0、N1、N2、N3、N4 分别表示氮添加量 0、50、100、150、300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

Note: Data represented as Mean±SD. A, B and C are the responses of RVI, GNDVI and MSR values of poplar plantation to nitrogen addition. 1-5 are the observation results of GF1 PMS1 on August 13, 2013, GF1 PMS2 on July 21, 2014, GF2 PMS2 on June 14, 2015, GF2 PMS2 on July 27, 2016, and Sentinel-2 MSI observation on July 13, 2018. Different lowercase letters indicated significant difference among treatments ($P < 0.05$), the same and the presence of the same lowercase letters indicated that the differences between treatments are not significant ($P > 0.05$). N0, N1, N2, N3, and N4 denote nitrogen additions of 0, 50, 100, 150, and 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

50~300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 水平的氮添加对杨树人工林的生长仍然呈积极促进作用,这可能与研究地的位置以及试验树种有关。本研究地位于沿海地区,相比于内陆地区土壤更加缺乏氮元素,而且杨树作为速生乔木对氮的利用率很高 (Toillon *et al.*, 2016) 杨

树人工林会大量利用土壤中的氮,导致土壤中的氮含量更加不足,因此 5 年的氮添加仍然促进东台杨树人工林的生长。

研究表明,模拟氮沉降试验后期与试验前期不同,对森林生态系统生产力具有抑制作用 (李德军

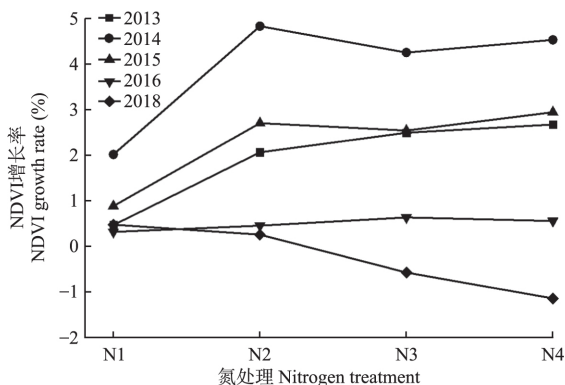


图4 东台杨树人工林 2013—2018 年各氮添加处理下 NDVI 的增长率

Fig.4 Growth rate of NDVI under various nitrogen addition treatments in Dongtai poplar plantation from 2013 to 2018

等 2003) 这与本研究结果相一致, 通过 6 年的模拟氮沉降实验, 至 2018 年, 高氮处理与超高氮处理均开始抑制杨树的生长, 这可能与森林生态系统的氮素饱和度有关, 长期连续的高水平氮添加处理使得土壤有较高的含氮量并趋于饱和度(樊后保等, 2006), 也有试验表明持续 7 年的氮添加 ($40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 会导致重庆马尾松林土壤酸化和氮饱和, 使得马尾松的生长显著下降 (Huang *et al.*, 2015)。

3.3 氮添加对杨树人工林的滞后性影响

结果表明, 2014 年之后各氮添加处理 NDVI 值的增长率均逐年下降, 到 2018 年高氮处理和超高氮处理 NDVI 值的增长率已经变为负值, 即已经开始抑制杨树的生长, 这可能与氮沉降的滞后性有关。氮添加对人工林的影响除即时性影响外还有滞后性影响, 即对杨树生长有影响的不仅是当前所施加的氮, 还包括过去施加的氮 (Aber *et al.*, 1998), 某一年氮沉降对人工林生长的影响可能还包括前几年的叠加影响。

一方面, 从短期来看, 东台杨树人工林处于沿海地区, 土壤偏碱性, 且土壤缺乏氮元素 (许凯等, 2014), 导致短期的氮添加类似于向杨树人工林进行“施氮肥”处理, 甚至超高氮添加仍然促进杨树生长; 另一方面, 从长期来看, 长期氮添加通过 NO_3^- 的淋溶和 NH_4^+ 的硝化导致土壤酸化, pH 值降低 (Guo *et al.*, 2014), 土壤 pH 的改变导致 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等盐基离子大量流失, 重金属元素活化, 使土壤缓冲能力下降, 由此影响土壤微生物的生物量和群落结构 (赵超等, 2015), 加上氮沉降同时会通过改变凋落物中

木质素、纤维素含量, 以此改变凋落物的分解速率 (彭赛等, 2016), 改变生态系统的营养循环, 进而影响人工林树木的生长, 这些复杂的动态变化是一个漫长而缓慢的过程, 且受多种因素影响, 因此, 氮沉降在对杨树人工林生长的影响上也表现出一定的滞后。

要确切了解氮沉降对树木生长的影响, 仍然需要开展长期研究, 模拟氮沉降实验即使连续进行 30 年也仍然显得时间不够 (Högberg *et al.*, 2006)。

4 结 论

在研究模拟氮沉降对杨树人工林的影响时, 在长时间序列上杨树对不同水平的氮添加响应不同。本研究通过遥感手段提取长时间序列上杨树人工林的 NDVI 值发现: (1) 经过 4 年的模拟氮沉降试验, 各水平氮添加处理均促进杨树生长; (2) 经过 2 年的模拟氮沉降, 对杨树生长的促进作用最大, 随着模拟氮沉降继续进行, 促进作用逐渐降低; (3) 经过 6 年的模拟氮沉降, 中低水平氮添加促进杨树生长, 高水平 and 超高水平氮添加抑制杨树生长, 且随着添加水平的增高, 促进作用逐渐减弱抑制在作用逐渐增强。这一研究结果表明, 只研究模拟氮沉降的即时性影响是远远不够的, 还应该充分考虑氮沉降的滞后性效应, 即应该开展长期试验, 在长时间序列上探讨氮沉降对植物和生态系统的影响。

参考文献

- 邓浩俊, 张丽娜, 张广帅, 等. 2015. 氮沉降对木荷马尾松林叶片元素计量比的影响. 森林与环境学报, 35(2): 118-124. [Deng JH, Zhang LN, Zhang GS, *et al.* 2015. Effects of nitrogen deposition on leaf elements and their stoichiometric ratios in *Schima superba* and *Pinus massoniana* mixed forest. *Journal of Forest and Environment*, 35(2): 118-124.]
- 樊后保, 黄玉梓. 2006. 陆地生态系统氮饱和对植物影响的生理生态机制. 植物生理与分子生物学报, 32(4): 395-402. [Fan HB, Huang YZ. 2006. Ecophysiological mechanism underlying the impacts of nitrogen saturation in terrestrial ecosystems on plants. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 32(4): 395-402.]
- 樊后保, 刘文飞, 李燕燕, 等. 2007. 亚热带杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林生长与土壤养分对氮沉降的响应. 生态学报, 27(11): 4630-4642. [Fan HB, Liu WF, Li YY, *et al.* 2007. Tree growth and soil nutrients in response to nitrogen deposition in a subtropical Chinese fir plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 27(11): 4630-4642.]
- 方运霆, 莫江明, 周国逸, 等. 2005. 鼎湖山主要森林类型植

- 物胸径生长对氮沉降增加的初期响应. 热带亚热带植物学报, **13**(3): 198-204. [Fang YT, Mo JM, Zhou GY, et al. 2005. Response of diameter at breast height increment to N additions in forests of Dinghushan biosphere reserve. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, **13**(3): 198-204.]
- 冯 露, 岳德鹏, 郭 祥. 2009. 植被指数的应用研究综述. 林业调查规划, **34**(2): 48-52. [Feng L, Yue DP, Guo X. 2009. A review on application of normal different vegetation index. *Forest Inventory and Planning*, **34**(2): 48-52.]
- 葛美香, 赵 军, 仲 波, 等. 2017. FY3/VIRR 及 MERIS 与 EOS/MODIS 植被指数比较与差异原因分析. 遥感技术与应用, **32**(2): 262-273. [Ge MX, Zhao J, Zhong B, et al. 2017. Comparison of the vegetation indexes between FY-3/VIRR, FY3/MERIS and EOS/MODIS data. *Remote Sensing Technology and Application*, **32**(2): 262-273.]
- 国家林业局森林资源管理司. 2010. 第七次全国森林资源清查及森林资源状况. 林业资源管理, (1): 1-8. [Division of Forest Resources Management, SFA. 2010. The seventh national inventory of forest resources and the status of forest resources. *Forest Resources Management*, (1): 1-8.]
- 何兴元, 任春颖, 陈 琳, 等. 2018. 森林生态系统遥感监测技术研究进展. 地理科学, **38**(7): 997-1011. [He XY, Ren CY, Chen L, et al. 2018. The Progress of forest ecosystems monitoring with remote sensing techniques. *Scientia Geographica Sinica*, **38**(7): 997-1011.]
- 黄玉梓, 樊后保, 李燕燕, 等. 2009. 氮沉降对杉木人工林生长及林下植被碳库的影响. 生态环境学报, **18**(4): 1407-1412. [Huang YZ, Fan HB, Li YY, et al. 2009. Effects of nitrogen deposition on tree growth and understory carbon pools in Chinese fir plantation. *Ecology and Environmental Sciences*, **18**(4): 1407-1412.]
- 李 喆, 胡 蝶, 赵登忠, 等. 2015. 宽波段遥感植被指数研究进展综述. 长江科学院院报, **32**(1): 125-130. [Li Z, Hu D, Zhao DZ, et al. 2015. Research advance of Broadband Vegetation Index using remotely sensed images. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, **32**(1): 125-130.]
- 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 2003. 氮沉降对森林植物的影响. 生态学报, **23**(9): 1891-1900. [Li DJ, Mo JM, Fang YT, et al. 2003. Impact of nitrogen deposition on forest plants. *Acta Ecologica Sinica*, **23**(9): 1891-1900.]
- 李德仁, 王长委, 胡月明, 等. 2012. 遥感技术估算森林生物量的研究进展. 武汉大学学报(信息科学版), **37**(6): 631-635. [Li DR, Wang CW, Hu YM, et al. 2012. General review on remote sensing-based biomass estimation. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **37**(6): 631-635.]
- 李万钰, 陈晓勇, 易 洁, 等. 2020. 基于遥感生态指数的赣江新区生态质量评价. 东华理工大学学报(自然科学版), **43**(1): 83-89. [Li WY, Chen XY, Yi J, et al. 2020. Ecological quality assessment in Ganjiang new district based on remote sensing ecological index. *Journal of East China University of Technology*, **43**(1): 83-89.]
- 鲁显楷, 莫江明, 董少峰. 2008. 氮沉降对森林生物多样性的影响. 生态学报, **28**(11): 5532-5548. [Lu XK, Mo JM, Dong SF. 2008. Effects of nitrogen deposition on forest biodiversity: A view. *Acta Ecologica Sinica*, **28**(11): 5532-5548.]
- 鲁显楷, 莫江明, 张 炜, 等. 2019. 模拟大气氮沉降对中国森林生态系统影响的研究进展. 热带亚热带植物学报, **27**(5): 500-522. [Lu XK, Mo JM, Zhang W, et al. 2019. Effects of simulated atmospheric nitrogen deposition on forest ecosystems in China: An overview. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, **27**(5): 500-522.]
- 马鹏宇, 张红光, 咎 鹏, 等. 2019. 长期氮添加对东北地区兴安落叶松人工林土壤酶的影响. 植物研究, **39**(4): 598-603. [Ma PY, Zhang HG, Zan P, et al. 2019. Effects of long-term nitrogen addition on soil enzymes in *Larix gmelinii* plantation in northeast China. *Bulletin of Botanical Research*, **39**(4): 598-603.]
- 裴昊斐, 高卫东, 方骄阳, 等. 2019. 模拟氮沉降对一年生香椿幼苗生长和光合特性的影响. 中国生态农业报(中英文), **27**(10): 1546-1552. [Pei HF, Gao WD, Fang JY, et al. 2019. Effects of simulated nitrogen deposition on growth and photosynthetic characteristics of one-year-old *Toona sinensis* seedlings. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, **27**(10): 1546-1552.]
- 彭 赛, 张雅坤, 葛之葳, 等. 2016. 氮沉降对微生物分解森林地上凋落物过程的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), **40**(1): 1-7. [Peng S, Zhang YK, Ge ZW, et al. 2016. Effects of nitrogen deposition on litter decomposition by microorganisms in forests. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, **40**(1): 1-7.]
- 王国兵, 徐 瑾, 王 瑞, 等. 2019. 添加生物炭对东台滨海区杨树人工林 3 种温室气体排放的长期影响. 生态环境学报, **28**(6): 1152-1158. [Wang GB, Xu J, Wang R, et al. 2019. Long term effects of biochar addition on three greenhouse gases emission under a poplar plantation in Dongtai coastal region. *Ecology and Environmental Sciences*, **28**(6): 1152-1158.]
- 王睿照, 毛沂新, 张慧东, 等. 2020. 模拟氮沉降对辽东山区长白落叶松人工林树木生长的影响. 辽宁林业科技, (3): 14-17, 78. [Wang RZ, Mao YX, Zhang HD, et al. 2020. Effects of simulated nitrogen deposition on tree growth in *Larix olgensis* plantation in mountainous area of eastern Liaoning. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology*, (3): 14-17, 78.]
- 王万才, 闫文德, 李忠文, 等. 2019. 氮添加对马尾松人工林凋落物分解的影响. 中南林业科技大学学报, **39**(12): 55-61+69. [Wang WC, Yan WD, Li WZ, et al. 2019. Effects of nitrogen addition on litter decomposition in *Pinus massoniana* plantation forest. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, **39**(12): 55-61+69.]
- 许 凯, 徐 钰, 葛之葳, 等. 2014. 氮添加对杨树人工林土壤活性有机碳季节变化的影响. 南京林业大学学报(自

- 然科学版), 38(3): 19-23. [Xu K, Xu Y, Ge ZW, et al. 2014. Effects of nitrogen addition on the seasonal variations of soil labile organic carbon in different age poplar plantations. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 38(3): 19-23.]
- 许凯, 徐钰, 张梦珊, 等. 2014. 氮添加对苏北沿海杨树人工林土壤活性有机碳库的影响. *生态学杂志*, 33(6): 1480-1486. [Xu K, Xu Y, Zhang MS, et al. 2014. Effects of simulated nitrogen deposition on soil active organic carbon in poplar plantations along Northern Jiangsu coast. *Chinese Journal of Ecology*, 33(6): 1480-1486.]
- 张 姗. 2019. 归一化植被指数研究. *绿色科技*, (20): 25-28. [Zhang S. 2019. Research on Normalized Difference Vegetation Index. *Journal of Green Science and Technology*, (20): 25-28.]
- 赵 超, 张文文, 阮宏华, 等. 2015. 模拟氮沉降对杨树人工林土壤微生物群落结构的影响. *生态学杂志*, 34(2): 360-366. [Zhao C, Zhang WW, Ruan HH, et al. 2015. Effects of elevated nitrogen deposition on microbial community structure in poplar plantation. *Chinese Journal of Ecology*, 34(2): 360-366.]
- 甄晓菊, 张雪红, 吴国明, 等. 2019. 基于 Sentinel-2A NDVI 时间序列数据的冬小麦识别. *江苏农业科学*, 47(16): 239-245C. [Zhen XJ, Zhang XH, Wu GM, et al. 2019. Winter wheat identification based on Sentinel-2A NDVI time series data. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 47(16): 239-245C.]
- 周丹燕, 卜丹蓉, 葛之葳, 等. 2015. 氮添加对沿海不同林龄杨树人工林土壤动物群落的影响. *生态学杂志*, 34(9): 2553-2560. [Zhou DY, Bu DR, Ge ZW, et al. 2015. Effects of nitrogen addition on soil fauna in poplar plantation with different ages in a coastal area of eastern China. *Chinese Journal of Ecology*, 34(9): 2553-2560.]
- Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, et al. 1998. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *BioScience*, 48: 921-934.
- Berger TW, Glatzel G. 2001. Response of *Quercus petraea* seedlings to nitrogen fertilization. *Forest Ecology and Management*, 149: 1-14.
- Chen C, Xu Z, Hughes J. 2002. Effects of nitrogen fertilization on soil nitrogen pools and microbial properties in a hoop pine (*Araucaria cunninghamii*) plantation in southeast Queensland, Australia. *Biology and Fertility of Soils*, 4: 276-283.
- Guo X, Wang R, Chang R, et al. 2014. Effects of nitrogen addition on growth and photosynthetic characteristics of *Acer truncatum* seedlings. *Dendrobiology*, 72: 151-161.
- Högberg P, Fan H, Quist M, et al. 2016. Tree growth and soil acidification in response to 30 years of experimental nitrogen loading on boreal forest. *Global Change Biology*, 12: 489-499.
- Huang YM, Kang RH, Mulder J, et al. 2015. Nitrogen saturation, soil acidification, and ecological effects in a subtropical pine forest on acid soil in southwest China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120: 2457-2472.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Summary for Policy Makers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: 1-18.
- Kerr J, Ostrovsky M. 2003. From space to species: Ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology & Evolution*, 18: 299-305.
- Kjonaas O, Stuanes A, Huse M. 1998. Effects of weekly nitrogen additions on N cycling in a coniferous forest catchment. *Forest Ecology and Management*, 101: 227-249.
- Liu XJ, Zhang Y, Han WX, et al. 2013. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 494: 459-462.
- Nagendra H. 2001. Using remote sensing to assess biodiversity. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 2377-2400.
- Toillon J, Dallé R, Bodeineau G, et al. 2016. Plasticity of yield and nitrogen removal in 56 *Populus deltoides* × *P. nigra* genotypes over two rotations of short-rotation coppice. *Forest Ecology and Management*, 375: 55-65.

作者简介 王浩斌,男,1997年生,硕士研究生,主要从事林业遥感方面的研究。E-mail: wanghaobin@njfu.edu.cn
责任编辑 张 敏

王浩斌,濮毅涵,徐丹丹. 2021. 基于高分和哨兵卫星影像研究氮沉降对杨树人工林的影响. *生态学杂志*, 40(7): 1907-1915.
Wang HB, Pu YH, Xu DD. 2021. Assessing the impacts of nitrogen deposition on poplar plantation based on Gaofen and Sentinel imagery. *Chinese Journal of Ecology*, 40(7): 1907-1915.