



彭开兵¹ 韩其飞^{1,2} 李超凡¹ 许文强³ 唐华岗¹ 王婧¹ 张昌银¹ 王珂¹

天山北坡典型草地净初级生产力对氮沉降及气候变化的响应阈值研究

摘要

生态阈值现象普遍存在于自然系统中,气候变化幅度过大,超出了生态系统本身的调节和修复能力,生态系统的结构功能就会遭到破坏,新疆干旱区气候波动明显,该区草地生态系统对大气氮沉降和气候变化的响应是否存在阈值,有待深入研究.本文以天山北坡海拔梯度分布的四种草地类型(高山草甸(AM)、中山森林草地(MMFM)、低山干草原(LMDG)和平原荒漠草原(PDG))为研究对象,基于DNDC模型,揭示氮沉降及气候变化对天山北坡草地生态系统净初级生产力的影响.研究表明:1)草地净初级生产力(NPP)对氮沉降增加的响应存在阈值,PDG、LMDG、MMFM和AM的响应阈值分别为 20 ± 5.77 、 60 ± 26.46 、 50 ± 15.28 和 $30 \pm 11.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.2)四种草地类型的NPP从大到小依次为MMFM、LMDG、PDG和AM,水热条件是决定NPP的主要因素.3)PDG草地NPP对温度升高的响应存在阈值,而对于其他类型的草地,在目前的研究中尚未得出确切结论.4)PDG和LMDG草地NPP与降水有明显的正相关关系,而AM草地NPP的变化与降水变化呈负相关.不同草地类型对降水变化的敏感程度也有较大差异,PDG最大,其次是LMDG,之后是AM和MMFM.

关键词

氮沉降; 气候变化; 净初级生产力; DNDC 模型

中图分类号 P941.75

文献标志码 A

收稿日期 2020-05-19

资助项目 荒漠与绿洲生态国家重点实验室开放基金(G2018-02-05, G2019-02-03)

作者简介

韩其飞(通信作者),女,博士,副教授,主要从事全球气候变化研究. hanqifei@nuist.edu.cn

0 引言

受独特的地理位置和自然条件影响,新疆具有丰富的自然资源,但生态环境极其脆弱,易受全球气候变化以及人类活动等外界因素的影响,成为生态环境脆弱区.近30年来新疆干旱区降水量呈现增加的趋势,年降水量平均每10年增加 $1.2 \text{ mm}^{[1-2]}$.随着 CO_2 等温室气体排放的不断增加,全球变暖在持续加剧^[3].在此气候背景下,近55年新疆草地净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)总量的时间动态变化总体呈缓慢增加趋势,平均每10年递增速率约为 $1.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (以C计,下同)^[4].然而,任何生物对于环境因子的适应都会有一个生态学上的最大量和最小量,超过这个最大量或者低于这个最小量,生物的生长就会受到影响.干旱区草地生态系统对温度和降水的响应是否存在阈值,有待深入研究.

氮素作为陆地生态系统中植物生长需要最多的营养元素之一,是限制大多数陆地植物光合作用的主要因子^[5].草地生态系统的氮沉降研究表明,尽管氮沉降可以提高草地土壤氮的利用率,提高草地生态系统的生产力,但是氮沉降也对草原物种丰度、土壤基本理化性质等产生了影响^[6].通常,氮沉降增加直接提高生态系统的可利用性氮含量,显著影响着植物-土壤系统的氮素循环,促进植物光合作用,提高净初级生产力.但是随着施氮量的增加,施氮对植物光合作用的影响逐渐减弱甚至是无影响^[7].

在水热条件显著改善的前提下,氮素对于干旱半干旱生态系统碳水循环的影响也会凸显.然而,已有氮素添加对生态系统碳动态影响的研究未取得较为统一的结论,且施氮对生态系统碳循环产生的促进或抑制的影响会因试验地点气候、土壤、植物群落等条件的不同而各异,同时不同施氮强度的影响效应也存在较大差异.张晓琳等^[8]认为氮沉降可以增加土壤中氮素的可利用性,从而促进植物生长.而白珍建^[9]在贝加尔针茅草甸草原的研究中认为,增氮对群落生产力没有显著影响.草地生态系统对氮沉降的响应如何,以及是否存在响应阈值还存在较大不确定性.

通过在站点尺度直接观测NPP具有很大的局限性.一是无法对生态过程及其机理进行深入分析,二是由于速度慢、成本较高、测点

1 南京信息工程大学 地理科学学院,南京,210044

2 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京,210044

3 中国科学院新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐,830011

少等缺陷,无法进行大范围观测和推广^[10].鉴于站点尺度直接观测法的局限性,陆地生态系统模型成为研究气候变化和人类活动对生态系统结构与功能影响不可替代的手段^[11].张文娟^[12]利用 DNDC (DeNitrification and DeComposition) 模型对“三江源”地区的模拟中得出,草地总生物量和土壤有机碳的模拟值与实测值呈显著的线型相关,模拟结果能够较好地解释实测数据.王多斌^[13]认为增温显著增加高寒草甸的地上净初级生产力 (Aboveground Net Primary Productivity, ANPP),短期内增温对土壤有机碳的影响并不显著,并且认为 DNDC 模型能较好地模拟高寒草甸地上生物量和土壤有机碳对气候因子(温度、降水)和放牧强度变化的响应.

基于此,本研究拟选择具有显著气候和地形差异、草地类型多样的新疆天山北坡的四种草地类型作为研究对象,基于 DNDC 模型,利用多情景因子实验,模拟气候变化及大气氮沉降对于新疆天山北坡不同海拔草地生态系统 NPP 的影响,并揭示其响应阈值.本研究量化地研究多重因子对草地生态系统 NPP 的贡献,利用生态系统过程模型研究克服了站点尺度直接观测法的局限性,丰富了当前研究领域的研究方法.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新疆天山地处欧亚大陆腹地,属于典型的温带大陆干旱性气候,光热资源充足,降水量稀少.天山北坡的降雨和温度的垂直梯度变化明显,发育了典型高山草甸 (Alpine Meadow, AM, 2 700~3 500 m)、中山森林草地 (Mid-Mountain Forest-Meadow, MMFM, 1 650~2 700 m)、低山干草原 (Low-Mountain Dry Grassland, LMDG, 650~1 650 m) 和平原荒漠草原 (Plain Desert Grassland, PDG, <650 m) (图 1).从温

度、降水以及潜在蒸发分析 (表 1),低海拔的 PDG 和 LMDG 牧草生长主要受水分胁迫,相对于水分条件,热量条件在生长期是完全可以满足植被生长的,不会影响或限制低海拔植被的生长;而高海拔 MMFM 和 AM 牧草的温度热量条件是限制牧草生长的关键性因子,相对于热量条件,水分条件在生长期能够满足植被的生长,不会对高海拔植被的生长产生较大影响.

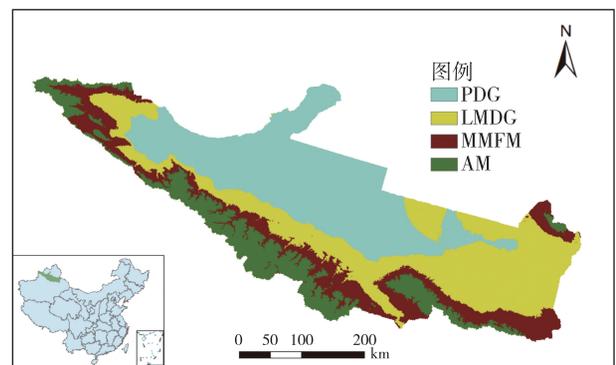


图 1 新疆天山北坡地理位置及分区

Fig. 1 Geographical location of northern slope of Tianshan Mountain

AM 区地势高峻、气候寒冷、无霜期短,土壤多属高寒草甸土和高寒草甸沼泽土,有机质含量丰富.因地温低、湿度大,有机质不易分解,含有效成份不高.牧草生长低,植被以喜温耐寒植物为主,可作夏季牧场.MMFM 气候湿润温和、冬暖夏凉,土壤为亚高寒草甸土和山地森林草甸土,有机质含量丰富.在向阳的沟谷中,牧草生长茂盛,植被种类丰富,以中生、中旱生植物为主,其上部草场作夏季牧场,下部草场作冬牧场.LMDG 气候干旱,夏季炎热、冬季温和,土壤为棕栗钙土和淡栗钙土,植被以中旱生植物为主,主要作春秋牧场.PDG 夏季炎热、冬季寒冷,土壤为砂质原始灰棕色荒漠土和残余荒漠盐土,主要作冬牧场.

表 1 天山北坡主要草地生态系统基本特征

Table 1 Characteristics of grassland ecosystem on the northern slopes of Tianshan Mountain

草地类型	海拔高度/ m	植被覆盖度/ %	气候条件			建群种
			年平均气温/ (°C)	降水量/ mm	潜在蒸发/ mm	
PDG	<650	20~70	10.33	228	1 753	苔草、早熟禾、紫穗苣、珠芽蓼、老鹤草、羽衣草
LMDG	[650 1650)	30~80	8.33	315	926	铁杆蒿、苔草、禾草、三叶草、羽衣草、百里香、冷蒿、针茅
MMFM	[1650 2700)	70~90	2.20	592	661	冷蒿、苔草、针茅、狐茅、铁杆蒿、土地肤
AM	[2700 3500)	50~90	-1.06	501	748	琵琶柴、碱柴、怪柳、猪毛菜

1.2 DNDC 模型

DNDC 模型主要根据生物学、化学和物理学等相关领域的经典方程建立,是主要应用于模拟生态系统中碳氮循环的生物地球化学模型^[14-15]. DNDC 模型不仅能够反映土壤、气象和作物多系统之间的碳氮循环,还能够较为准确地预测作物产量、碳氮淋溶等,是亚太地区首选的生物地球化学模型^[15-16]. 利用 DNDC 模型进行点位模拟时,需要输入该地逐日气象数据、土壤性质和管理措施等参数.本研究基于研究区三工河流域 2007—2008 年草地地上生物量对 DNDC 模型进行参数化,使之更适用于干旱区草地生态系统.

1.3 情景模拟

根据新疆天山北坡地区 1982—2014 年的气象数据,模拟得到研究区四种草地类型 1982—2014 年的平均 NPP. 预计在 1900—2100 年期间全球平均地面气温将升高 1.4~5.8 °C^[17]. 通过设置四种草地类型温度分别增加 1~6 °C, 模拟得出增温后的草地 NPP, 并计算得到 1982—2014 年草地 NPP 的平均值, 根据每种草地类型在各个模拟情景下的平均 NPP, 得到各个草地类型 NPP 随温度变化的趋势. 预计 21 世纪全球年平均降水会增加, 区域尺度上降水增加或减少的幅度在 5%~20%, 其中高纬地区的降水量很可能增加, 而大多数副热带大陆地区的降水量可能减少^[16]. 依据当前气候状况, 对各个地区的降水分别予以增减 10% 和 20%, 而保持其他气候条件不变, 模拟得到当降水量增减 10% 和 20% 后的草地 NPP, 取其各个模拟情景的平均值, 得到四种草地类型草地 NPP 对降水变化的响应机制. 据文献统计, 到 2100 年, 氮沉降有可能达到 60~80 Tg·a⁻¹^[18]. 本文通过添加氮素来模拟大气氮沉降变化, 分别对四种草地添加不同量的氮素, 来模拟草地 NPP 对不同的大气氮沉降速率的响应.

1.4 模型验证

本文利用在东天山奇台、天山北坡不同海拔高度和平原荒漠草原区设置的围栏和观测点, 进行了生物量、土壤水分、质地和养分的观测和结果分析, 重点对高山草甸、中山森林草地、低山干草原和平原荒漠草原年地上净初级生产力分别进行验证. 选择均方根误差法 RMSE (Root-Mean-Square Error, 其量值记为 η_{RMSE}) 来对本研究区进行精度验证. $\eta_{\text{RMSE},n}$ 是模拟值和观测值偏差的平方和与观测次数比值的平方根, 验证公式为

$$\eta_{\text{RMSE},n} = \frac{1}{O_n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \times 100\%,$$

式中 O_i 为观测值, S_i 为模拟值, $\overline{O_n}$ 为观测值的平均, n 为样本容量. $\eta_{\text{RMSE},n}$ 的值越小, 模型对研究区的适应性越好, 模拟精度越高, 结果越可靠.

2 结果

2.1 模型精度验证

利用 2007 年和 2008 年的实测地上生物量与模拟得到的地上净初级生产力 (Above-ground Net Primary Productivity, ANPP) 进行模型验证, 结果如图 2 所示. PDG、LMDG、MMFM 和 AM 四种草地类型的 $\eta_{\text{RMSE},n}$ 值分别为 7.36%、10.24%、17.38% 和 4.37%. 模型精度能够满足研究需求.

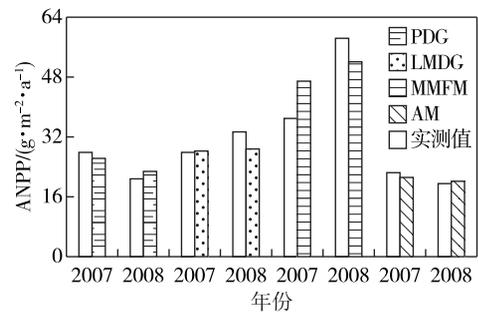


图 2 2007—2008 年 ANPP 模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison between simulated and measured ANPP in 2007–2008

2.2 四种草地类型 NPP 分析

根据模拟结果 (图 3), 研究区的四种草地类型的草地 NPP 差异较大, 其中 MMFM 的草地 NPP 最大, 达到了 129.95 g·m⁻²·a⁻¹, 其次是 LMDG, 草地 NPP 为 110.02 g·m⁻²·a⁻¹, PDG 和 AM 草地 NPP 分别为 66.79 和 54.65 g·m⁻²·a⁻¹. PDG、LMDG 和 MMFM 的变化趋势很明显, 草地 NPP 随着海拔的增高出现了先增加后减小的趋势, 海拔最高的 AM, 草地 NPP 明显低于其他三种草地类型.

2.3 气候变化对新疆草地生态系统 NPP 的影响

2.3.1 温度

如图 4 所示, 在增温 1~4 °C 时, 四种类型草地生态系统 NPP 都持续增加. 当温度增幅超过 4~5 °C 时, PDG 生态系统 NPP 呈现出明显的下降趋势, 但是, 在增温 6 °C 时, 草地 NPP 仍高于不增温情景下的草地 NPP, 整体上依旧处于增长状态. 而其他三种草

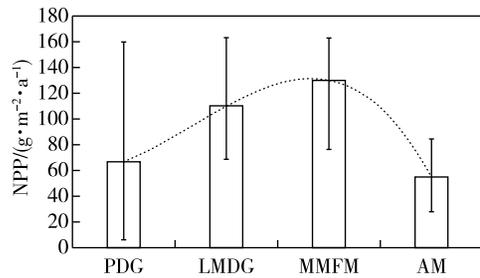


图3 四种草地类型草地 NPP 对比

Fig. 3 Comparison of NPP between 4 grassland types

地类型表现为 NPP 持续增长,而且不同草地类型对增温的敏感程度也有较大的差异,各个草地类型的敏感程度从大到小依次为 MMFM、AM、LMDG 和 PDG.对于不同的草地类型,平均每增加 1 °C,PDG、LMDG、MMFM 和 AM 草地 NPP 分别增加 0.98 ± 0.84 、 7.60 ± 3.61 、 25.59 ± 4.35 和 $22.48 \pm 1.86 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

2.3.2 降水

如图 5 所示,PDG 和 LMDG 草地生态系统 NPP 与降水量的增加或减少,呈正相关关系,但是二者对降水变化的敏感程度有差异,就目前模拟结果显示,PDG 对降水的敏感程度要大于 LMDG,降水每增减 10%,PDG 和 LMDG 的 NPP 分别增减 9.97 ± 3.16 和 $6.90 \pm 0.32 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.在 MMFM 生态系统,降水减少时,草地 NPP 呈下降趋势,且降水减少 20% 比减少 10% 时 NPP 下降更为显著.在 AM 生态系统,当降水

减少时,NPP 表现为增大,当降水增加时,NPP 呈现出减少的趋势,平均降水每增加 10%,草地 NPP 减少 $2.21 \pm 1.13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

2.4 氮沉降对新疆草地生态系统 NPP 的影响

如图 6 所示,在四种草地类型中,NPP 均随着施氮量的增加而增加,但达到一定阈值后,草地 NPP 对施氮的增加的响应变弱,直至不再有明显增加.PDG、LMDG、MMFM 和 AM 草地,得到草地 NPP 最大值时,施氮量分别为 20 ± 5.77 、 60 ± 26.46 、 50 ± 15.28 和 $30 \pm 11.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.并且,四种草地类型对施氮的敏感程度也有较大差异,从大到小依次为 LMDG、AM、MMFM 和 PDG.

3 讨论

3.1 新疆各种草地类型 NPP 对比分析

气温和降水量对植物的净初级生产力具有决定性的影响,草地的净初级生产力主要是受限于所在区域的气温和降水,过高或者过低的气温以及降水量都不能产生较高的草地生产力,只有在二者达到相对平衡时才有可能产生较高的草地生产力^[19].PDG 生态系统海拔较低、气温较高,但是降水量却很稀少,严重不足的降水难以支撑植物生长所需要的大量水分,因此该地区草地 NPP 相较于中海拔降水和气温较适宜的 LMDG 和 MMFM 要低得多.而 AM 由于其海拔较高、气温较低,随着海拔的上升,温度

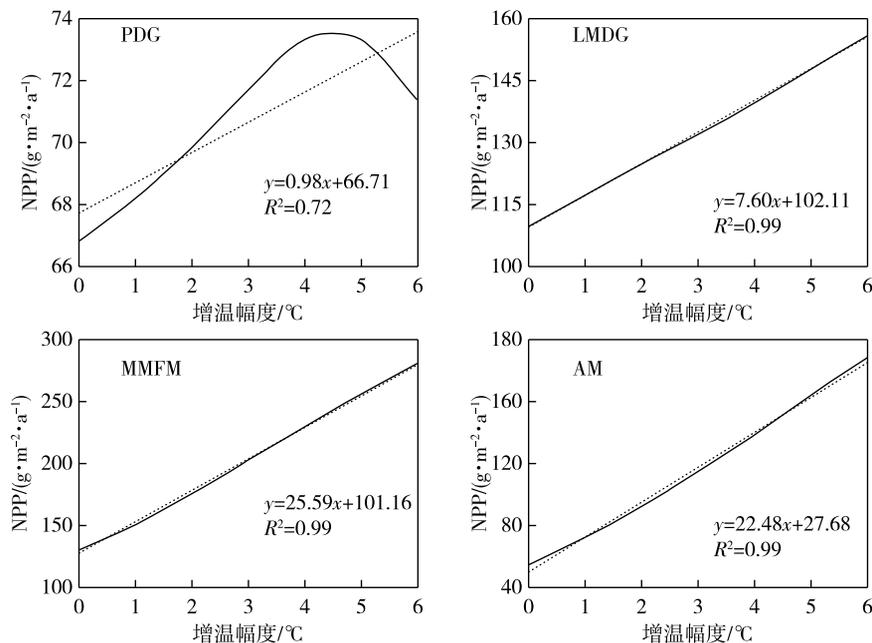


图4 温度变化对草地 NPP 的影响

Fig. 4 Effects of temperature change on grassland NPP

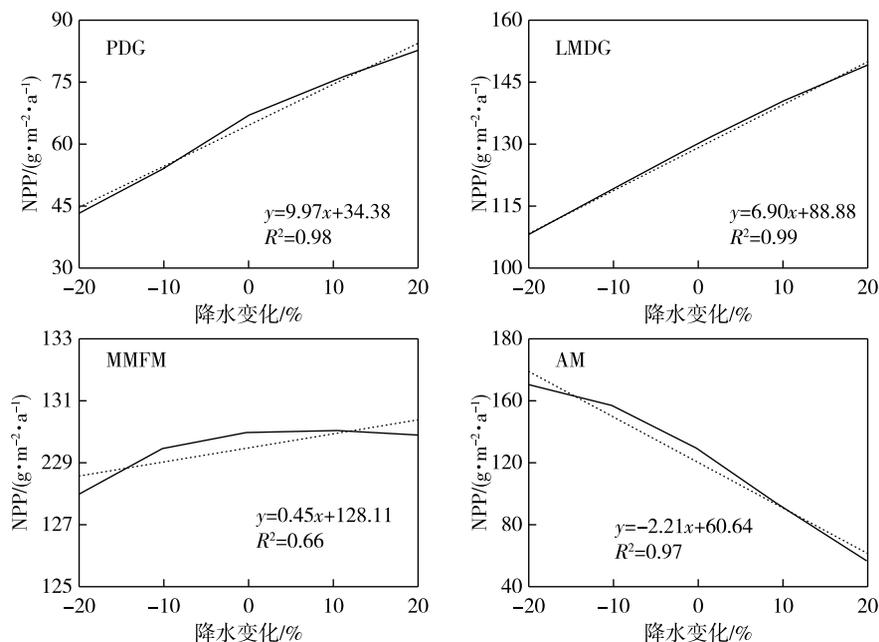


图5 降水变化对草地 NPP 的影响

Fig. 5 Effects of precipitation change on grassland NPP

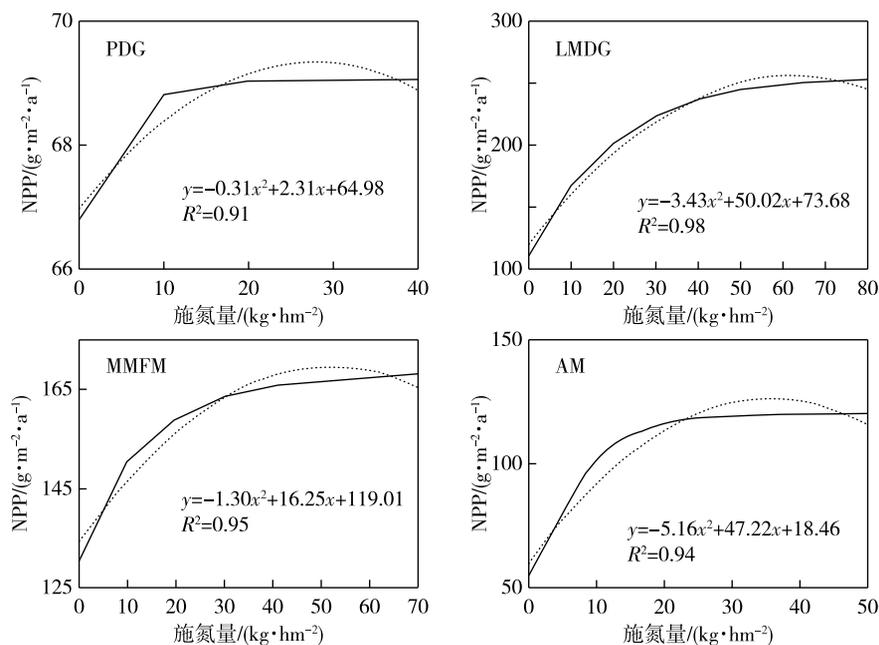


图6 氮沉降增加对草地 NPP 的影响

Fig. 6 Effects of increasing nitrogen deposition on grassland NPP

成为植物生长的关键限制条件^[20],因此尽管降水较充足,但是较低的气温极大地限制了植物的生长,导致该地区草地 NPP 较低.任璇等^[21]的研究显示,新疆地区 2000—2014 年草地植被的 NPP 大概在 50~170 g·m⁻²·a⁻¹.在本文的模拟中,四种草地类型的草地 NPP 也均在这个范围内.

3.2 气温对新疆草地生态系统 NPP 的影响分析

在增温模拟实验中,起初四种不同类型的草地 NPP 均随温度的增加而增加,温度升高往往对植物光合作用具有促进作用,因此在气候变暖条件下植物同化作用增强,从而生产力提高^[22].但是不同于其他草地类型,低海拔的 PDG 草地增温 5℃ 以后,草地

NPP 开始出现下降趋势,主要是由于该地区海拔较低,气温本身较高,而且降水稀少,增温会增加该地区的水量消耗,导致该地区缺水更为严峻.在干旱半干旱地区,降水是生产力的主要限制因素,降水匮乏会导致草地 NPP 显著降低^[23].其他类型的草地 NPP 依然呈增长趋势,这说明增温对 PDG 草地 NPP 有一定的响应阈值,而对于其他类型的草地是否存在响应阈值,在目前的研究中尚未得出确切结论,但是如果存在,它们的阈值必然是大于 6 °C 的.这说明,不同海拔地区 NPP 对升温的响应阈值不同^[24-25].相较于海拔较低的 PDG 和 LMDG 来说,MMFM 和 AM 草地对温度变化的响应较为显著,增温对高寒草地生态系统生产力具有明显的促进作用^[26].这主要是因为该地区海拔较高、气温较低,而温度被认为是制约低温地区植物生长的关键因素^[27].

3.3 降水对新疆草地生态系统 NPP 的影响分析

在气候变量中,水分供应和水分平衡是影响草地生产力和草地分布的最重要的因子.在草地生态系统中,地上部净初级生产力与年降水量有很好的线性关系.草地产量变化 90% 是由年降水量造成的^[28].陈卓奇等^[29]在青藏高原的研究中认为,草地植被生产力受到水热条件共同制约,在高原东南部,降水量大于 450 mm,植物生产力主要受温度影响,温度越高,生产力就越高;而在广大的西北部地区,降水量低于 450 mm,植被生产力变化的主导因子为气温,即降水越多,生产力越高.在温度和降水模拟中,也得出了较为相似的结果,即在 PDG 和 LMDG 草地,海拔低、温度高、降水稀少,降水量增加,草地 NPP 增长显著,并且降水量减少时,草地 NPP 也随之减少,而温度变化所带来影响,较 MMFM 和 AM 弱.在 MMFM 和 AM 草地,海拔较高、温度较低、降水量较大,草地 NPP 主要受气温影响较为显著,当温度增加时,草地 NPP 的增长远高于 PDG 和 LMDG 草地.并且,在 MMFM 和 AM 草地,当降水量增加时,草地 NPP 还出现了下降趋势,并且 AM 草地降水量减少时,草地 NPP 出现了增长的趋势.这是由于随海拔升高、温度降低而降水增加^[30],MMFM 和 AM 草地降水量本就较大,因此增加降水可能导致该地区降水量过大,从而增加了土壤碳和氮的淋溶损失,并且可能导致植物内部代谢发生紊乱,清除活性氧自由基的超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶的活性显著降低,而丙二醛等有毒物质的含量显著升高.此外,过多的土壤会导致植物根系进行无氧呼

吸,使得植物的养分和水分吸收效率降低,进而引起植物生长发育受阻,甚至死亡^[28].随着海拔梯度的变化,水热因子影响着土壤养分等因子的变化,而土壤养分的高低,直接影响着草地 NPP.草地生产力与土壤有机碳和全氮含量呈正相关关系.

3.4 氮沉降速率对新疆草地生态系统 NPP 的影响分析

氮素作为陆地生态系统中植物生长需要最多的营养元素之一,是限制大多数陆地植物光合作用的主要因子,氮沉降可以通过增加叶面积指数、促进叶片或植株的光截获能力、提高光能利用效率以及提高羧化能力来促进植物的光合能力等^[31].对于四种草地类型,添加氮素都促进了草地 NPP 增加,这说明在一定范围内,氮沉降速率与 NPP 呈现出一定的正相关关系,氮沉降速率的增加,提高了生态系统的 NPP^[24].白珍建^[9]在内蒙古自治区的研究中认为,氮沉降增加通常直接提高生态系统的可利用性氮含量,促进植物光合作用,提高净初级生产力,但是随着施氮量的增加,施氮对植物光合作用的影响逐渐减弱甚至是无影响^[32].在 PDG、LMDG、MMFM 和 AM 草地,当施氮量分别达到约 18.67、65.33、56 和 28 kg·hm⁻²时,草地 NPP 也都没有显著的提高.当植被的生长速度受到氮限制时,一定程度的氮沉降的增加对植物生产力的提高是有利的,但是过度的氮沉降会引起植物生产力的下降^[31].在 PDG、LMDG、MMFM 和 AM 四种草地类型下,添加相同量的氮素,各个草地类型的草地 NPP 变化也有很大的差异,这说明不同地理环境下,草地氮素添加的响应程度也有很大的不同,这主要是由于在不同地区,草地的类型、水分条件有很大区别,由于水分条件、物种类型等的不同,草地对氮沉降的响应也会表现出较大的差异.

氮沉降对于干旱区草地生态系统 NPP 的影响存在较大的不确定性.由于实验数据的缺乏,本研究通过查阅大量文献资料,总结了中国西部地区氮沉降对于地上净初级生产力(ANPP)、地下净初级生产力(Belowground Net Primary Productivity, BNPP)以及总净初级生产力(NPP)的影响,结果如表 2 所示.通过对比发现,模型结果与其他研究的结果可以相互佐证,进一步说明了该研究的可靠性.

3.5 不确定性分析

本研究基于三工河流域 2007—2008 年草地上生物量对 DNDC 模型进行参数化,使之更适用于

表 2 中国西北地区氮沉降对 NPP 影响的结果统计

Table 2 Statistics of the effect of nitrogen deposition on NPP in Northwest China

研究文献	氮输入/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	生物量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)			相关描述
		ANPP	BNPP	NPP	
李文娇等 ^[33]	0	40.66			羊草的地上生物量在氮素添加水平为 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时显著高于不添加氮素时,但是 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时差异并不显著
	15	41.97			
	30	44.59			
	50	73.44			
	100	93.11			
	150	103.61			
	200	209.70			
	300	224.26			
李禄军等 ^[34]	0	330.7			羊草在氮添加为 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时地上生物量达到峰值,之后,随着氮素水平的增加,地上生物量增幅减缓
	25	502.4			
	50	575.0			
	75	856.7			
	100	775.1			
	300	561.4			
祁瑜等 ^[35]	0	73.53	106.67		羊草在施氮水平为 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时地上生物量最大,施氮水平为 $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时,地下生物量最大
	300	86.63	113.17		
	600	102.4	104.14		
何丹等 ^[36]	0	36.36			施肥量为 $23\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时,对羊草地上生物量促进最为显著,施肥 $34.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,羊草开始出现递减效应
	11.5	45.84			
	23.0	119.77			
	34.5	85.96			
	46.7	75.12			
车敦仁等 ^[37]	0			205.13	施氮量为 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时,增产幅度最大,以后随着施氮量增加,增产幅度减小
	37.5			306.07	
	75.0			335.17	
	112.5			375.19	
	150.0			391.86	
	225.0			416.47	
王小东等 ^[38]	0	35.41			添加氮素对于群落物种的生产力具有明显的促进作用,尤其在低氮处理水平下这种促进作用更强
	10	95.87			
	50	75.17			
	100	62.65			

天山北坡草地生态系统.但模型的模拟结果仍然具有不确定性.首先,采样点较少,使得模型稳健程度降低;其次,DNDC 是生态系统过程模型,其在模拟过程中假设植被组成不变,但是这种假设过于理想化,与复杂多变的现实情形不符,导致模拟结果存在偏差;最后,影响草地生产力的因素非常复杂,本研究不能尽数考虑,必然使得结果存在偏差.比如草地 NPP 受到气候变暖、 CO_2 浓度、降水变率、放牧、草地开垦、工业生产等因素的综合影响^[39],仅考虑个别因素使得结果存在不确定性.

4 结论

生态阈值普遍存在于不同的生态系统中.随着自然科学的发展,生态阈值研究已经成为近年来的研究热点.本研究基于 DNDC 模型模拟了天山北坡沿海拔梯度分布的四个草地类型对于气候变化及氮沉降的响应阈值.找出退化生态系统的生态阈值,对科学、有目的地开展干旱区退化草地恢复工作有着重要的指导作用.研究发现,当增温大于 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 时,PDG 草地生态系统 NPP 开始出现下降的趋势,而其他类型草地 NPP 依然随着气温的升高而增加.当降水增

加 20% 时,草地 NPP 有减少趋势. PDG、LMDG、MMFM 和 AM 草地生态系统分别在施氮量约为 18.67、65.33、56 和 28 kg·hm⁻² 时达到响应阈值.

生态阈值具有复杂的时空效应,基于模型可以克服试验研究的缺陷,但仍存在不足. DNDC 是生态系统过程模型,其在模拟过程中假设植被组成不变,但是这种假设过于理想化,与复杂多变的现实情形不符,导致模拟结果存在偏差. 运行 DNDC 模型需要输入大量的生理生态参数,本文通过站点的实测数据及查阅文献中前人的研究结果对模型进行验证,数据量较少,导致模型稳健性较低. 因此,后续可在实证研究中增加样本范围和样本量,提高结论适用性.

参考文献

References

- [1] 胡增运,倪勇勇,邵华,等. CFSR、ERA-Interim 和 MERRA 降水资料在中亚地区的适用性[J]. 干旱区地理,2013,36(4):700-708
HU Zengyun, NI Yongyong, SHAO Hua, et al. Applicability study of CFSR, ERA-Interim and MERRA precipitation estimates in Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(4): 700-708
- [2] 陈发虎,黄伟,靳立亚,等. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异[J]. 中国科学:地球科学,2011,41(11):1647-1657
CHEN Fahu, HUANG Wei, JIN Liya, et al. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011, 41(11): 1647-1657
- [3] 刘洋洋,王倩,杨悦,等. 黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素[J]. 应用生态学报,2019,30(7):2309-2319
LIU Yangyang, WANG Qian, YANG Yue, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland NPP and its driving factors in the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2309-2319
- [4] 黄秉光,杨静,黄玫. 近 55 a 新疆植被净初级生产力的时空变化[J]. 沙漠与绿洲气象,2018,12(4):90-94
HUANG Bingguang, YANG Jing, HUANG Mei. The spatiotemporal variation of net primary productivity of vegetation in Xinjiang in recent 55 years[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2018, 12(4): 90-94
- [5] 吕超群,田汉勤,黄耀. 陆地生态系统氮沉降增加的生态效应[J]. 植物生态学报,2007,31(2):205-218
LÜ Chaoqun, TIAN Hanqin, HUANG Yao. Ecological effects of increased nitrogen deposition in terrestrial ecosystems[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(2): 205-218
- [6] 喻梅,高琼,许红梅,等. 中国陆地生态系统植被结构和净第一性生产力对未来气候变化响应[J]. 第四纪研究,2001,21(4):281-293
YU Mei, GAO Qiong, XU Hongmei, et al. Responses of vegetation distribution and primary production of the terrestrial ecosystems of China to climatic change[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(4): 281-293
- [7] 齐玉春,彭琴,董云社,等. 不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应[J]. 环境科学,2015,36(2):625-635
QI Yuchun, PENG Qin, DONG Yunshe, et al. Responses of ecosystem carbon budget to increasing nitrogen deposition in differently degraded leymus chinensis steppes in Inner Mongolia, China[J]. Environmental Science, 2015, 36(2): 625-635
- [8] 张晓琳,翟鹏辉,黄建辉. 降水和氮沉降对草地生态系统碳循环影响研究进展[J]. 草地学报,2018,26(2):284-288
ZHANG Xiaolin, ZHAI Penghui, HUANG Jianhui. Advances in the influences of precipitation and nitrogen deposition change on the carbon cycle of grassland ecosystem[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(2): 284-288
- [9] 白珍建. 增水增氮对草甸草原植物群落结构组成和功能的影响[D]. 长春:东北师范大学,2017
BAI Zhenjian. Effects of water and nitrogen addition on plant community structure, composition and function in meadow steppe[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2017
- [10] Mekasha A, Nigatu L, Tesfaye K, et al. Modeling the response of tropical highland herbaceous grassland species to climate change; the case of the Arsi Mountains of Ethiopia[J]. Biological Conservation, 2013, 168: 169-175
- [11] Yi S H, Wang X Y, Qin Y, et al. Responses of alpine grassland on Qinghai-Tibetan Plateau to climate warming and permafrost degradation: a modeling perspective[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(7): 074014
- [12] 张文娟. 气候变化与放牧管理对三江源草地生物量和土壤有机碳的影响[D]. 兰州:兰州大学,2018
ZHANG Wenjuan. The impact of climate change and grazing on grassland biomass and soil organic carbon in the Sanjiangyuan[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018
- [13] 王多斌. 高寒草甸植物群落和土壤有机碳对气候变化和放牧的响应[D]. 兰州:兰州大学,2019
WANG Duobin. Responses of plant community and soil organic carbon to climate change and grazing in alpine meadow[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019
- [14] 王瑞利,张存厚,王明玖. 基于 DNDC 模型的赛罕乌拉自然保护区草地生态系统碳动态[J]. 中国草地学报,2019,41(4):167-172
WANG Ruili, ZHANG Cunhou, WANG Mingjiu. Study on carbon dynamics of grassland ecosystem in Saihanwula nature reserve based on DNDC model[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(4): 167-172
- [15] 贾海霞,汪霞,李佳,等. 新疆焉耆盆地绿洲区农田土壤有机碳储量动态模拟[J]. 生态学报,2019,39(14):5106-5116
JIA Haixia, WANG Xia, LI Jia, et al. Dynamic simulation of soil organic carbon storage in farmland of the Yanqi Basin Oasis area, in Xinjiang province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5106-5116
- [16] 刘思源. 基于 DNDC 模型的稻田作物施肥生命周期评

- 价与施肥方案模拟优化研究[D].浙江大学,2019.
- LIU Siyuan. Life cycle assessment, scheme simulation and optimization of paddy field crop fertilization based on DNDC model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019
- [17] 郭靖. 气候变化对流域水循环和水资源影响的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010
- GUO Jing. Climate change impact on hydrological cycle and water resources[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010
- [18] 周晓兵, 张元明. 干旱半干旱区氮沉降生态效应研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3835-3845
- ZHOU Xiaobing, ZHANG Yuanming. Review on the ecological effects of N deposition in arid and semi-arid areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3835-3845
- [19] 苏清荷, 安沙舟, 赵玲. 基于5种气候生产力模型的天山北坡主要草地类型NPP计算分析[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(9): 1786-1791
- SU Qinghe, AN Shazhou, ZHAO Ling. Computation and analysis of NPP in northern slope of Tianshan Mountain based on 5 kinds of climate-productivity model[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(9): 1786-1791
- [20] 刘利利. 新疆不同草地类型植物多样性及与水热因子的关系[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016
- LIU Lili. The relationship between plant diversity and climate factors in different grassland types of Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016
- [21] 任璇, 郑江华, 穆晨, 等. 新疆近15年草地NPP动态变化与气象因子的相关性研究[J]. 生态科学, 2017, 36(3): 43-51
- REN Xuan, ZHENG Jianghua, MU Chen, et al. Correlation analysis of the spatial-temporal variation of grassland net primary productivity and climate factors in Xinjiang in the past 15 years[J]. Ecological Science, 2017, 36(3): 43-51
- [22] 李娜, 王根绪, 杨燕, 等. 短期增温对青藏高原高寒草甸植物群落结构和生物量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(4): 895-905
- LINA, WANG Genxu, YANG Yan, et al. Short-term effects of temperature enhancement on community structure and biomass of alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(4): 895-905
- [23] 李静宜. 草场管理方式与降水变化对内蒙古典型草原地上净初级生产力的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019
- LI Jingyi. Effects of grassland management and precipitation changes on aboveground net primary productivity of typical steppe in Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019
- [24] 方超. 模拟升温和氮沉降对黄土高原半干旱区苜蓿草地净初级生产力和土壤呼吸的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2015
- FANG Chao. The effects of nitrogen addition and warming on NPP and soil respiration on a semiarid alfalfa-grassland in the Loess Plateau of China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015
- [25] 陈志芳. 模拟增温和氮素添加对荒漠草原生态系统气体交换的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012
- CHEN Zhifang. The effect of simulated warming and N addition on ecosystem gas exchange in Inner Mongolia desert steppe[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012
- [26] 干珠扎布. 模拟气候变化对高寒草地物候期、生产力和碳收支的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017
- HASBAGAN Ganjurjav. Effects of climate change on phenology, productivity and carbon balance in alpine grasslands[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017
- [27] Hudson J M G, Henry G H R, Cornwell W K. Taller and larger: shifts in Arctic tundra leaf traits after 16 years of experimental warming[J]. Global Change Biology, 2011, 17(2): 1013-1021
- [28] 杨凯. 气候变化对藏北地区草地生产力的影响模拟[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007
- YANG Kai. Simulation study of climate change impacts on grassland productivity in northern Tibet[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007
- [29] 陈卓奇, 邵全琴, 刘纪远, 等. 基于MODIS的青藏高原植被净初级生产力研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(3): 402-410
- CHEN Zhuoqi, SHAO Quanqin, LIU Jiyuan, et al. Analysis of net primary productivity of terrestrial vegetation on the Qinghai-Tibetan Plateau, based on MODIS remote sensing data[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2012, 42(3): 402-410
- [30] 李翔, 王忠, 赵景学, 等. 念青唐古拉山南坡高寒草甸生产力对温度和降水变化的敏感性及其海拔分异[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5591-5601
- LI Xiang, WANG Zhong, ZHAO Jingxue, et al. Altitudinal variations in the sensitivity of alpine meadow productivity to temperature and precipitation changes along the southern slope of Nyainqentanglha Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5591-5601
- [31] 蒋丽. 松嫩草地光合特性对增温和氮素施加的响应[D]. 长春: 东北师范大学, 2012
- JIANG Li. Responds of Songnen grassland photosynthetic characteristics to warming and nitrogen addition[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2012
- [32] 贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 等. 外源碳氮添加对草地碳循环关键过程的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 1133-1141
- HE Yunlong, QI Yuchun, PENG Qin, et al. Effects of exogenous carbon and nitrogen addition on the key process of carbon cycle in grassland ecosystem: a review[J]. China Environmental Science, 2018, 38(3): 1133-1141
- [33] 李文娇, 刘红梅, 赵建宁, 等. 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[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6460-6469
- LI Wenjiao, LIU Hongmei, ZHAO Jianning, et al. Effects of nitrogen and water addition on plant species diversity and biomass of common species in the Stipa baicalensis Steppe, Inner Mongolia, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6460-6469
- [34] 李禄军, 曾德慧, 于占源, 等. 氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1838-1844
- LI Lujun, ZENG Dehui, YU Zhanyuan, et al. Effects of nitrogen addition on grassland species diversity and produc-

- tivity in Keerqin sandy land[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2009,20(8):1838-1844
- [35] 祁瑜,黄永梅,王艳,等.施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响[J].生态学报,2011,31(18):5121-5129
 QI Yu,HUANG Yongmei,WANG Yan,et al.Biomass and its allocation of four grassland species under different nitrogen levels[J].Acta Ecologica Sinica,2011,31(18):5121-5129
- [36] 何丹,李向林,何峰,等.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[J].中国草地学报,2009,31(5):42-46
 HE Dan,LI Xianglin,HE Feng,et al.Effect of nitrogen fertilizer on biomass and the important values of the main species in degraded grassland[J].Chinese Journal of Grassland,2009,31(5):42-46
- [37] 车敦仁,李方红,梅贤春,等.高寒地区施氮量对糙毛鹅观草产量和营养成分含量的影响[J].中国草地,1990,12(4):6-9
 CHE Dunren,LI Fanghong,MEI Xianchun,et al.Effects of applying different nitrogen quantity on herbage production and nutrient composition of *Roegneria hirsuta* in alpine meadow[J].中国草地,1990,12(4):6-9
- [38] 王小东,李旭,董乙强,等.模拟氮沉降对北疆盐生荒漠群落特征的影响[J].新疆农业科学,2016,53(5):967-973
 WANG Xiaodong,LI Xu,DONG Yiqiang,et al.Effects of simulated nitrogen deposition on community characteristics in saline desert ecosystem of northern Xinjiang[J].Xinjiang Agricultural Sciences,2016,53(5):967-973
- [39] 刘洋洋,章钊颖,同琳静,等.中国草地净初级生产力时空格局及其影响因素[J].生态学杂志,2020,39(2):349-363
 LIU Yangyang,ZHANG Zhaoying,TONG Linjing,et al.Spatiotemporal dynamics of China's grassland NPP and its driving factors[J].Chinese Journal of Ecology,2020,39(2):349-363

Effects of nitrogen deposition and climate change on NPP of typical grasslands on the northern slopes of Tianshan Mountain

PENG Kaibing¹ HAN Qifei^{1,2} LI Chaofan¹ XU Wenqiang³ TANG Huagang¹
 WANG Jing¹ ZHANG Changyin¹ WANG Ke¹

1 School of Geographical Sciences,Nanjing University of Information Science and Technology,Nanjing 210044

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,
 Nanjing University of Information Science and Technology,Nanjing 210044

3 Xinjiang Institute of Ecology and Geography,Chinese Academy of Sciences,Urumqi 830011

Abstract Climate change in the arid area of Xinjiang is obvious in recent years. Whether there is a threshold value for grassland ecosystem response to atmospheric nitrogen deposition and climate change in this area needs to be further studied. This paper takes the four types of grassland (alpine meadow (AM), mid-mountain forest-meadow (MMFM), low-mountain dry grassland (LMDG) and plain desert grassland (PDG)) in the northern slopes of Tianshan Mountain as research object, based on the DNDC model, to reveal the influence of atmospheric nitrogen deposition and climate change on the grassland net primary productivity (NPP). The results showed that: 1) there was a threshold value of NPP response to nitrogen deposition, and the response thresholds of PDG, LMDG, MMFM, and AM were 20 ± 5.77 , 60 ± 26.46 , 50 ± 15.28 , and $30 \pm 11.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively; 2) the hydrothermal condition was the main factor determining NPP; 3) there was a threshold value of NPP response to temperature rise in PDG grassland, while no definite conclusion had been drawn for the other types in the current study; 4) the NPP of PDG and LMDG grassland was positively correlated with precipitation, while the change of AM grassland NPP was negatively correlated with precipitation. The sensitivity of different grassland types to precipitation changes also varied greatly, with PDG being the largest, followed by LMDG, AM, and MMFM.

Key words nitrogen deposition; climate change; net primary productivity (NPP); DNDC model