

DOI: 10.5846/stxb202205311527

赵玮,王新兴,杨昊天,杨荣,叶学华,刘新平,曾凡江,马健,李向义,高永平,刘宇,于秀波.土壤碳氮特征沿干旱梯度时空格局及对气候变化的响应——基于中国生态系统研究网络(CERN)长期定位监测数据.生态学报,2023,43(9):3582-3591.

Zhao W, Wang X X, Yang H T, Yang R, Ye X H, Liu X P, Zeng F J, Ma J, Li X Y, Gao Y P, Liu Y, Yu X B. Spatio-temporal patterns of soil carbon and nitrogen characteristics along aridity gradients and their responses to climate change: Based on long-term field observation data of Chinese Ecosystem Research Network. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3582-3591.

土壤碳氮特征沿干旱梯度时空格局及对气候变化的响应

——基于中国生态系统研究网络(CERN)长期定位监测数据

赵 玮¹, 王新兴², 杨昊天³, 杨 荣⁴, 叶学华⁵, 刘新平⁶, 曾凡江⁷, 马 健⁸, 李向义⁷, 高永平³, 刘 宇^{1,9}, 于秀波^{1,9,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室中国生态系统研究网络综合中心,北京 100101

2 西北师范大学地理与环境科学学院,兰州 730070

3 中国科学院西北生态环境资源研究院沙坡头沙漠研究试验站,兰州 730000

4 中国科学院西北生态环境资源研究院临泽内陆河流域研究站,兰州 730000

5 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室,北京 100093

6 中国科学院西北生态环境资源研究院奈曼沙漠化研究站,兰州 730000

7 中国科学院新疆生态与地理研究所新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站,乌鲁木齐 830011

8 中国科学院新疆生态与地理研究所阜康荒漠生态国家野外科学观测研究站,乌鲁木齐 830011

9 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049

摘要:土壤碳氮含量及其化学计量特征是表征生态系统碳汇能力和土壤质量的重要指标,在支撑生态系统结构功能以及缓解气候变化中起着关键作用。利用中国生态系统研究网络(CERN)长期定位监测数据,分析了土壤碳氮特征沿干旱梯度的时空规律及其对气候变化的响应。结果表明:空间上,典型荒漠草原生态系统随着干旱加剧,土壤有机碳和全氮含量减少,土壤有机碳对干旱响应的敏感性降低,而土壤全氮对干旱响应的敏感性增加,土壤有机碳随土壤全氮含量的增加而增加。时间上,2005—2018年,荒漠草原生态系统土壤有机碳和全氮含量变化速率沿干旱梯度表现出由负转正的增加趋势,其中,干旱区呈减少趋势,半干旱和半湿润地区呈增加趋势,鄂尔多斯站和沙坡头站呈显著增加趋势。从影响因素来看,土壤碳氮特征对降水量增加的敏感性沿干旱梯度呈现先增强后减弱的“上凸”抛物线趋势,温度变化对土壤碳氮特征的调控没有表现出明显的干旱梯度效应。土壤碳氮比、土壤有机碳含量、土壤全氮含量对降水量和平均温度变化响应的敏感性均依次降低。不同干旱梯度土壤碳氮特征的变化规律为未来气候变化下生态系统结构与功能预测提供科学依据。

关键词:荒漠草原生态系统;土壤碳氮;化学计量;干旱梯度;水热调控

Spatio-temporal patterns of soil carbon and nitrogen characteristics along aridity gradients and their responses to climate change: Based on long-term field observation data of Chinese Ecosystem Research Network

ZHAO Wei¹, WANG Xinxing², YANG Haotian³, YANG Rong⁴, YE Xuehua⁵, LIU Xinpeng⁶, ZENG Fanjiang⁷,

基金项目:中国科学院国际合作局对外合作重点项目(121311KYSB20170004);中国科学院战略性先导科技专项(XDA19020305);中国博士后科学基金面上资助项目(2020M670439)

收稿日期:2022-05-31; 采用日期:2022-12-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuxb@igsnr.ac.cn

MA Jian⁸, LI Xiangyi⁷, GAO Yongping³, LIU Yu^{1,9}, YU Xiubo^{1,9,*}

1 Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

3 Shapotou Desert Research and Experimental Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

4 Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

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

6 Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

7 Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystems, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

8 Fukang Station of Desert Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

9 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Soil organic carbon content (SOC), soil total nitrogen content (TN) and its ecological stoichiometric characteristics indicate the carbon sink efficiency and soil quality of ecosystem, and play the critical role in supporting ecosystem structure and function and mitigating climate change. Using long-term field observation data of ecological stations of the Chinese Ecosystem Research Network (CERN), this study analyzed the spatio-temporal patterns of the SOC, TN and its stoichiometric characteristics of soil, and their responses to climate change along aridity gradient. Results showed that with the aridity intensifying spatially, the SOC and TN decreased, the response sensitivity of SOC to aridity decreased and that of the TN increased. The SOC was increased along the TN increasing. Temporally, the rate of SOC and TN changes with aridity gradient showed increased with the aridity mitigating, which were negative in the aridity region and positive in semi-arid region from 2005 to 2018. The SOC and TN of Shapotou station and Erdos station were significant increased with aridity change in past more than one decade. Additionally, the response sensitivity of the SOC, TN and stoichiometric characteristics to precipitation increasing showed an “upwardly convex” pattern, which firstly increased and then decreased with the aridity gradient, but none for temperature. The response sensitivity of the SOC, TN and carbon-nitrogen ratio to changes in precipitation and temperature were as follows: the sensitivity of soil carbon-nitrogen ratio > the sensitivity of SOC > the sensitivity of TN. It is implied that the rule of the SOC, TN and its ecological stoichiometric characteristics changes in different aridity gradient region provide the scientific basis for the of ecosystem structure and function prediction under future climate change.

Key Words: desert steppe ecosystem; soil carbon and nitrogen; stoichiometry; aridity gradient; regulation of precipitation and temperature

防治荒漠化、恢复退化的土地和土壤,是联合国可持续发展的重要目标之一。旱区以荒漠草原为主要生态系统类型,大于 90%的碳、氮储存在土壤中^[1],中国北方草地 96.6%的碳储存于土壤中^[2],旱区生态系统主导了全球陆地碳汇的变化趋势和年际变异^[3-4]。土壤碳氮比是土壤有机物中碳与氮素总质量的比值,是评价土壤质量状况^[5]和生态系统健康状况^[6]的重要指标,一定程度上反映了土壤微生物分解作用下碳的排放和吸收。土壤元素含量及其生态化学计量特征反映土壤养分元素平衡特征^[7],由于土壤形成因子和人类活动的影响,土壤碳氮总量变化较大,土壤碳氮比存在时空变异^[8]。土壤碳氮特征受到区域水热条件的调控,温度和降水主要通过影响植被光合作用、凋落物的分解过程和微生物分解效率,改变土壤碳氮特征,影响生态系统地球化学循环过程^[9-10]。然而,不同干旱梯度下的水热特征复杂多变,探究旱区生态系统土壤碳氮特征沿干旱梯度的时空格局及其对气候变化的响应,对于维持生态系统功能稳定性和可持续发展具有重要意义。

全球增温以及降水格局改变已成为不争的事实,诸多研究关注了土壤碳氮特征及其对全球变化的响

应^[11],但基于地理空间分异的气候梯度复杂性考虑较少,土壤碳氮比通常被认为是一个恒定不变的值,目前在模型分析中通常依据土壤碳氮比值估算土壤碳含量^[8]。基于 meta 分析的研究表明,在干旱条件下,土壤有机碳呈降低趋势,而土壤总氮含量的增加并不显著^[11];降水是荒漠草原生态系统养分循环的关键调控因子,不同降水条件对土壤可溶性氮(DN)影响显著,而对土壤可溶性有机碳(DOC)影响不显著,对 DOC/DN 影响显著,当降水减少 50%(极端干旱)时 DOC/DN 随降水增加而增加,同时 DN 显著增加^[12];不同雨量带土壤碳、氮含量随降水减少而减少^[13];长期的增温降低了>2000 μm 土壤团聚体有机碳含量,对其他粒径有机碳含量无显著影响^[14]。总体而言,旱区生态系统中水分可利用性是土壤碳氮含量的主要限制因素,降水和温度变化影响土壤碳氮特征,基于反映降水和温度综合效应的干旱梯度下土壤碳氮特征的规律研究鲜有报道。考虑基于地理空间分异的土壤碳氮特征及其响应对于准确估算全球碳氮循环过程,为模型模拟提供参数估计,对提高气候变化背景下陆地生态系统碳汇估算的准确性具有重要意义。

干旱面积的增加和强度增强给生态系统结构功能带来严重后果,土壤生态化学计量特征受到干旱梯度的显著影响^[15]。然而,对于沿干旱梯度的跨区域和长时间序列的土壤碳氮时空格局及其对气候变化的响应还没有形成系统的认识。我国旱区以荒漠草原生态系统为主,降水稀少,年际变异性大,生态系统对气候变化响应敏感,是研究生态系统养分循环与气候变化的理想区域。本研究主要基于中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)六个生态站综合观测场的监测数据,分析位于不同干旱梯度区域的土壤碳氮特征空间格局,进一步在气候暖湿化趋势背景下,探究土壤碳氮特征对温度和降水的响应差异及沿干旱梯度的变化规律,以期制定缓解气候变化的政策决策和促进可持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择位于我国西北旱区的 CERN 长期定位监测生态站,按地理位置自西向东依次包括策勒站(CLD)、阜康站(FKD)、临泽站(LZD)、沙坡头站(SPD)、鄂尔多斯站(ESD)和奈曼站(NMD)(图 1)。这些站点深居内陆,降水稀少,季节分布不均,气候干旱,属于温带大陆性气候,以荒漠草原为主。根据 1982—2015 年平均干

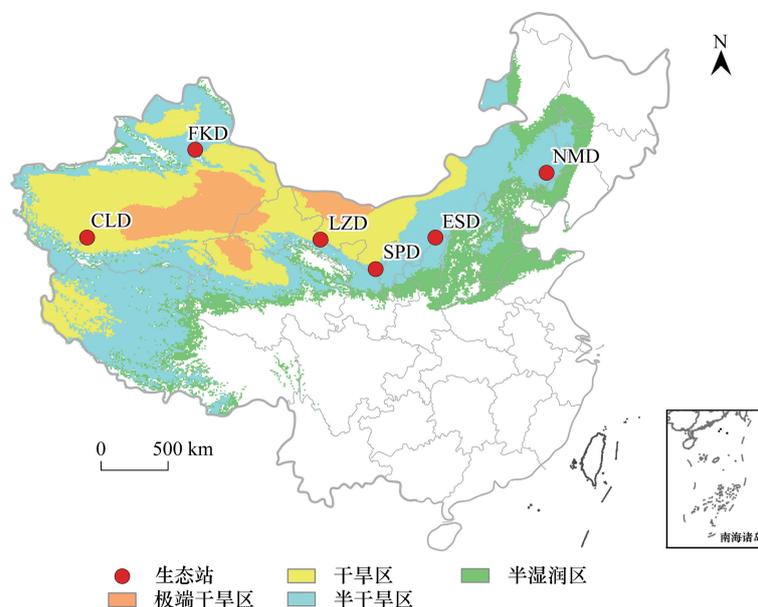


图 1 中国生态系统研究网络(CERN)生态站点示意图

Fig.1 Location of Chinese Ecosystem Research Network (CERN) ecological stations

CLD:策勒站;FKD:阜康站;LZD:临泽站;SPD:沙坡头站;ESD:鄂尔多斯站;NMD:奈曼站

旱指数(Aridity Index, AI)^[16],将干旱区划分为极端干旱区(AI<0.05),干旱区(0.05≤AI<0.2),半干旱区(0.2≤AI<0.4),半湿润区(0.4≤AI<0.65)。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源与处理

土壤养分和气候数据来源于国家生态科学数据中心资源共享服务平台(www.cnern.org.cn)。选择2005—2018年长时间序列的土壤监测数据,土壤样品采样地点位于各站点综合观测场,采集时间集中在生长季8—9月。土壤养分包括土壤有机碳和全氮,5个重复,采样深度为0—10 cm和10—20 cm,土壤有机碳用重铬酸钾氧化-外加热法测定,土壤全氮用凯氏定氮法测定。气候数据来源于对应站点气象观测场,包括生长季(4月至9月)的温度和降水数据。计算0—10 cm和10—20 cm的土壤碳氮数据平均值,作为站点0—20 cm平均土壤碳氮含量;分别计算2005—2018年6个站点每年生长季的平均温度和降水总量。1982—2015年,6个站点平均干旱指数分别为0.0662(CLD)、0.2169(FKD)、0.1485(LZD)、0.2141(SPD)、0.4173(ESD)和0.4207(NMD)^[16],呈现出自西向东由干变湿的干旱梯度特征。策勒站和临泽站属于干旱区,阜康站和沙坡头站属于半干旱区,鄂尔多斯站和奈曼站属于半湿润区。生态站基本信息见表1。

表1 中国生态研究网络(CERN)生态站基本情况

Table 1 Basic information of Chinese Ecosystem Research Network (CERN) ecological stations

生态站 Ecological Stations	代码 Code	样地 Sample Field	土壤类型 Soil Type	成土母质 soil parent materials	植物群落 Plant Communities	干旱指数 Aridity Index
策勒站	CLD	综合观测场	风沙土	风成砂	骆驼刺	0.0662
临泽站	LZD	综合观测场	灰棕漠土	洪积-冲积物	红砂-泡泡刺群落	0.1485
沙坡头站	SPD	综合观测场	风沙土	风成砂	以油蒿为主的人工天然林	0.2141
阜康站	FKD	综合观测场	风沙土	风积沙	天然梭梭群落	0.2169
鄂尔多斯站	ESD	综合观测场	风沙土	砂岩	油蒿-羊柴灌丛	0.4173
奈曼站	NMD	综合观测场	草甸土	冲积物	黄蒿+禾草群落	0.4207

1.2.2 统计分析

使用SPSS 20.0对数据进行统计分析,采用Pearson相关分析检验土壤有机碳与全氮的相关性;采用最小二乘法线性拟合分析土壤养分特征对气候变化的响应特征,以线性拟合方程的斜率表示敏感性大小,正、负斜率分别表示土壤养分特征对气候变化的正响应和负响应,统计显著水平为 $P<0.05$ 。运用Sigplot、ArcGIS、Matlab进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤碳氮特征沿干旱梯度的空间格局

典型荒漠草原生态系统0—20 cm平均土壤有机碳含量为(3.36±1.18) g/kg,站点之间变异系数为35.1%(图2)。在空间上,随气候干旱加剧(干旱指数减小)土壤有机碳含量表现出减少的趋势。其中,奈曼站干旱指数最大(AI=0.421),土壤有机碳含量最高,为(5.43±0.89) g/kg;其次为鄂尔多斯站(AI=0.417),土壤有机碳含量为(4.08±1.85) g/kg;再次为沙坡头站(AI=0.214)和阜康站(AI=0.217),土壤有机碳含量分别为(3.45±1.01) g/kg和(3.02±0.39) g/kg;最为干旱的临泽站(AI=0.149)和策勒站(AI=0.066),土壤有机碳含量分别为(1.79±0.18) g/kg和(2.38±0.34) g/kg。在荒漠草原生态系统中,与从半湿润区过渡到半干旱区相比($SOC=9.62AI+0.80, P=0.11$),从半干旱区过渡到干旱区土壤有机碳随干旱指数变化的斜率($SOC=6.59AI+1.60, P=0.36$)更小,即随着干旱程度的加剧,土壤有机碳含量对干旱响应的敏感性下降。

典型荒漠草原生态系统平均土壤全氮含量为(0.24±0.07) g/kg,空间变异系数为30.5%(图2),土壤全氮含量沿干旱梯度的变化与土壤有机碳含量基本一致,随干旱加剧而减少,但趋势并不明显。其中,奈曼站土壤全氮含量最高,为(0.38±0.07) g/kg,不同的是,位于半干旱区的沙坡头站土壤氮含量((0.29±0.06) g/kg)高

于位于半湿润区的鄂尔多斯站 (0.22 ± 0.07) g/kg; 最后, 临泽站、策勒站和阜康站的土壤氮含量都较低且基本相当, 分别是 (0.19 ± 0.04) g/kg、(0.18 ± 0.05) g/kg 和 (0.18 ± 0.03) g/kg。在荒漠草原生态系统中, 与土壤有机碳含量相比, 土壤全氮含量并没有表现出随干旱梯度的显著变化 ($P > 0.05$), 但随干湿状况的空间分异明显, 半湿润区较高, 干旱区较低。与从半湿润区过渡到半干旱区相比 ($TN = 0.295AI + 0.18, P = 0.51$), 从半干旱区过渡到干旱区土壤全氮含量随干旱梯度的斜率 ($TN = 0.371AI + 0.15, P = 0.52$) 更大, 即随着干旱程度的加剧, 土壤全氮含量对干旱梯度响应的敏感性增强。

典型荒漠草原生态系统平均土壤碳氮比为 14.38, 空间变异系数为 22.7% (图 2), 沿干旱梯度并没有明显的变化规律。其中, 鄂尔多斯站土壤碳氮比最高, 为 (19.16 ± 6.87), 其次为阜康站 (17.54 ± 2.60), 奈曼站和策勒站土壤碳氮比相当, 分别为 (14.46 ± 2.18) 和 (14.0 ± 3.49), 沙坡头站和临泽站土壤碳氮比较低, 分别为 (11.50 ± 1.55) 和 (9.65 ± 2.24)。荒漠草原生态系统土壤碳氮比随空间干旱梯度的规律不明显 ($P > 0.05$)。此外, 荒漠草原生态系统土壤有机碳与全氮含量呈现出极显著正相关关系 ($P < 0.0001$), 有机碳含量随着土壤全氮的增加而增加 (图 2)。

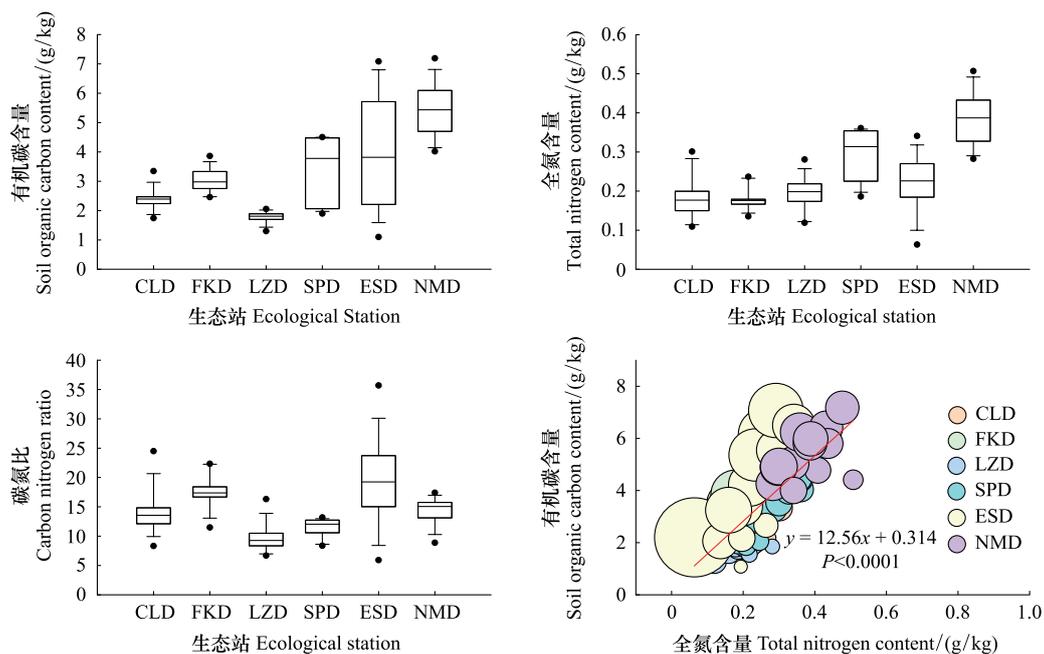


图 2 土壤有机碳含量、全氮含量和碳氮比的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil carbon content, total nitrogen content and carbon nitrogen ratio

2.2 土壤碳氮特征沿干旱梯度的长期趋势

2005—2018 年, 荒漠草原生态系统土壤有机碳含量在干旱区表现出降低趋势, 在半干旱和半湿润区表现出增加的趋势。其中, 策勒站和阜康站土壤有机碳变化速率分别为 $-2.36 \times 10^{-2} \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($P = 0.332$) 和 $-4.37 \times 10^{-2} \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($P = 0.1083$), 鄂尔多斯站增加速率最大 ($3.863 \times 10^{-1} \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$, $P < 0.001$), 其次为沙坡头站 ($2.273 \times 10^{-1} \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$, $P < 0.0001$), 奈曼站和临泽站增加速率最小, 分别为 $8.8 \times 10^{-2} \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($P = 0.1596$) 和 $8.6 \times 10^{-3} \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($P = 0.5173$) (图 3)。过去十几年, 荒漠草原生态系统土壤有机碳含量变化速率呈现出沿干旱梯度由负转正的增加趋势。

荒漠草原生态系统土壤全氮含量与土壤有机碳变化规律基本一致, 在干旱区呈减少趋势, 在半干旱和半湿润区呈增加趋势。其中, 策勒站和阜康站土壤全氮变化速率分别为 $-2 \times 10^{-3} \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($P = 0.5882$) 和 $-0.3 \times 10^{-3} \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($P = 0.8643$), 沙坡头和鄂尔多斯站土壤全氮含量增加速率最高, 分别为 $13.5 \times 10^{-3} \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($P < 0.0001$) 和 $12.8 \times 10^{-3} \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($P = 0.0023$), 其次为临泽站 ($5.3 \times 10^{-3} \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$, $P = 0.0512$), 奈曼站增加速率

最低($0.8 \times 10^{-3} \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$, $P=0.8606$) (图 3)。荒漠草原生态系统土壤全氮含量变化速率呈现出沿干旱梯度由负转正的增加趋势。

土壤碳氮比在特定生态系统中是一个相对稳定的值,其变化速率体现了一个时期土壤碳氮状况的相对变化程度,反映了土壤质量和生态系统功能状况。2005—2018 年,沙坡头站土壤碳氮比呈显著增加趋势 ($0.275/\text{a}$, $P=0.0039$),鄂尔多斯站、奈曼站和策勒站也表现出增加趋势但并不显著 ($P>0.05$),阜康站和临泽站呈减小趋势 ($P>0.5$) (图 3),荒漠草原生态系统土壤碳氮比没有表现出沿干旱梯度的明显规律。站点多年平均土壤碳氮比高于荒漠草原生态系统土壤碳氮比均值 (14.38) 时,如果该站点土壤碳氮比表现出增加趋势,该站点生态系统功能可能存在受到氮限制的风险,土壤质量下降,比如阜康站和鄂尔多斯站。相反,站点多年平均土壤碳氮比低于荒漠草原生态系统土壤碳氮比均值时,如果土壤碳氮比呈增加趋势,该站点土壤质量改善,具有一定的碳汇能力,如沙坡头站;如果土壤碳氮比呈降低趋势,该站点可能存在碳流失或者氮富集情况,如临泽站有机碳变化不明显,全氮有增加趋势。策勒站和奈曼站平均土壤碳氮比与区域均值比较接近,且都表现出增加的趋势,但情况不同,策勒站土壤有机碳和全氮都是降低趋势,表明氮限制风险更大,奈曼站土壤有机碳和全氮都是增加趋势,表明具有一定的碳汇潜力。

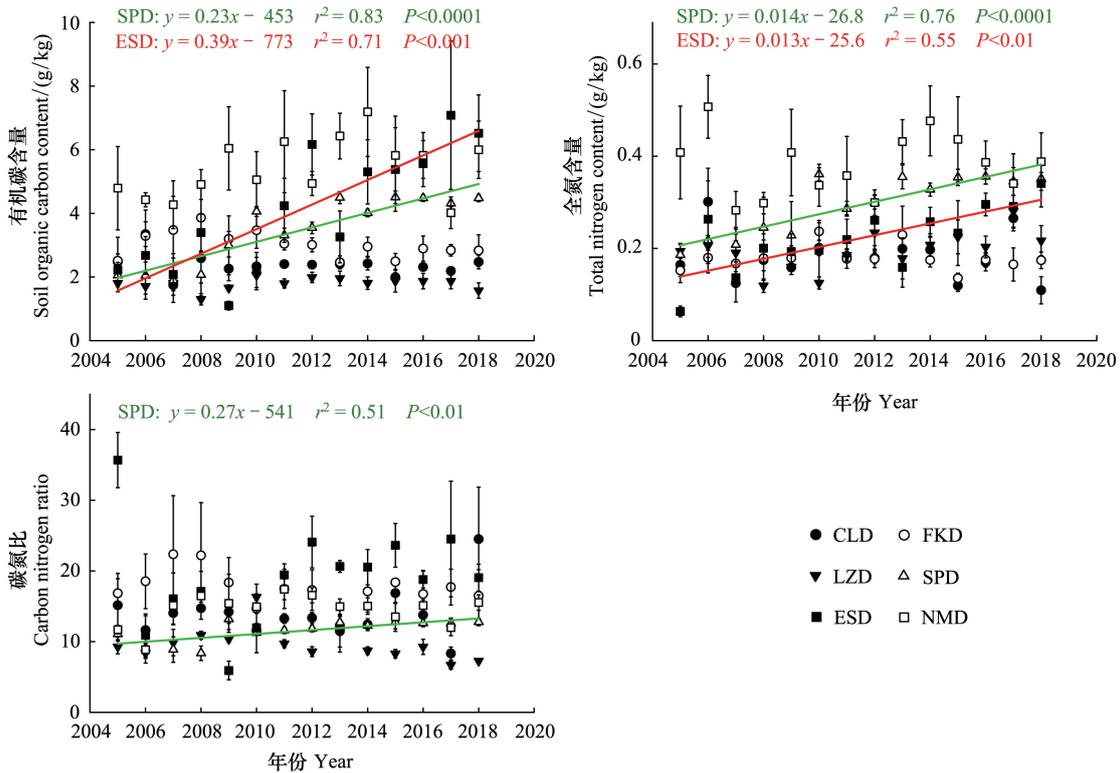


图 3 2005—2018 年荒漠草原生态站点土壤碳氮特征变化趋势

Fig.3 Trends of soil carbon and nitrogen characteristic of desert grassland ecological stations from 2005 to 2018

2.3 土壤碳氮特征年际变异的水热调控

土壤碳氮特征与生长季平均温度和降水量的相关分析结果表明,荒漠草原生态系统土壤碳氮特征与降水量呈显著正相关关系,与平均温度呈显著负相关关系(其中,土壤碳氮比与平均温度呈边缘显著性 ($P=0.076$)),表明土壤碳氮特征受到强烈的水热控制。对降水量变化的响应敏感性 (S_{pre}) 表现为: $S_{pre \text{ 土壤碳氮比}} (1.37 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}) > S_{pre \text{ 土壤有机碳}} (0.91 \times 10^{-2} \text{ g kg}^{-1} \text{ mm}^{-1}) > S_{pre \text{ 土壤全氮含量}} (0.04 \times 10^{-2} \text{ g kg}^{-1} \text{ mm}^{-1})$,对平均温度变化响应的敏感性 (S_{tem}) 表现为: $S_{tem \text{ 土壤碳氮比}} (0.528 \text{ g kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}) > S_{tem \text{ 土壤有机碳含量}} (0.35 \text{ g kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}) > S_{tem \text{ 土壤全氮含量}} (1.6 \times 10^{-2} \text{ g kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$ (图 4)。

水分有效性是旱区生态系统结构和功能的主要调控因子。沙坡头站和鄂尔多斯站土壤碳氮特征与降水量呈正相关关系,降水量增加使得土壤有机碳、土壤全氮和土壤碳氮比增加;阜康站和临泽站土壤有机碳和土壤碳氮比与降水量呈正相关关系,而土壤全氮与降水量呈负相关关系,降水量的增加可能会增加植物氮吸收降低土壤全氮含量;策勒站和奈曼站土壤碳氮特征与降水量相关性较小甚至呈负相关关系。总之,降水量增加可能会促进半干旱(沙坡头站)和半湿润(鄂尔多斯站)地区的土壤有机碳、全氮和碳氮比的增加,其中对土壤有机碳和全氮含量增加的促进作用要大于土壤碳氮比;在干旱地区(阜康站和临泽站)可能会使得土壤全氮含量降低,有机碳含量增加,进而增加碳氮比,土壤质量下降;而在更加干旱(策勒站)和更加湿润(奈曼站)的地区,降水量对土壤碳氮特征的调控作用减弱甚至向负相关方向发展。因此,降水量增加对土壤碳氮特征的促进作用沿干旱梯度呈现出先增强后减弱的“上凸”抛物线趋势,在干旱地区要注意可能引起的氮限制风险。此外,生长季平均温度与土壤有机碳和全氮含量相关性不明显或弱负相关关系,与土壤碳氮比在策勒站和沙坡头站呈负相关,其他站点呈正相关关系,沿干旱梯度没有明显的规律特征。

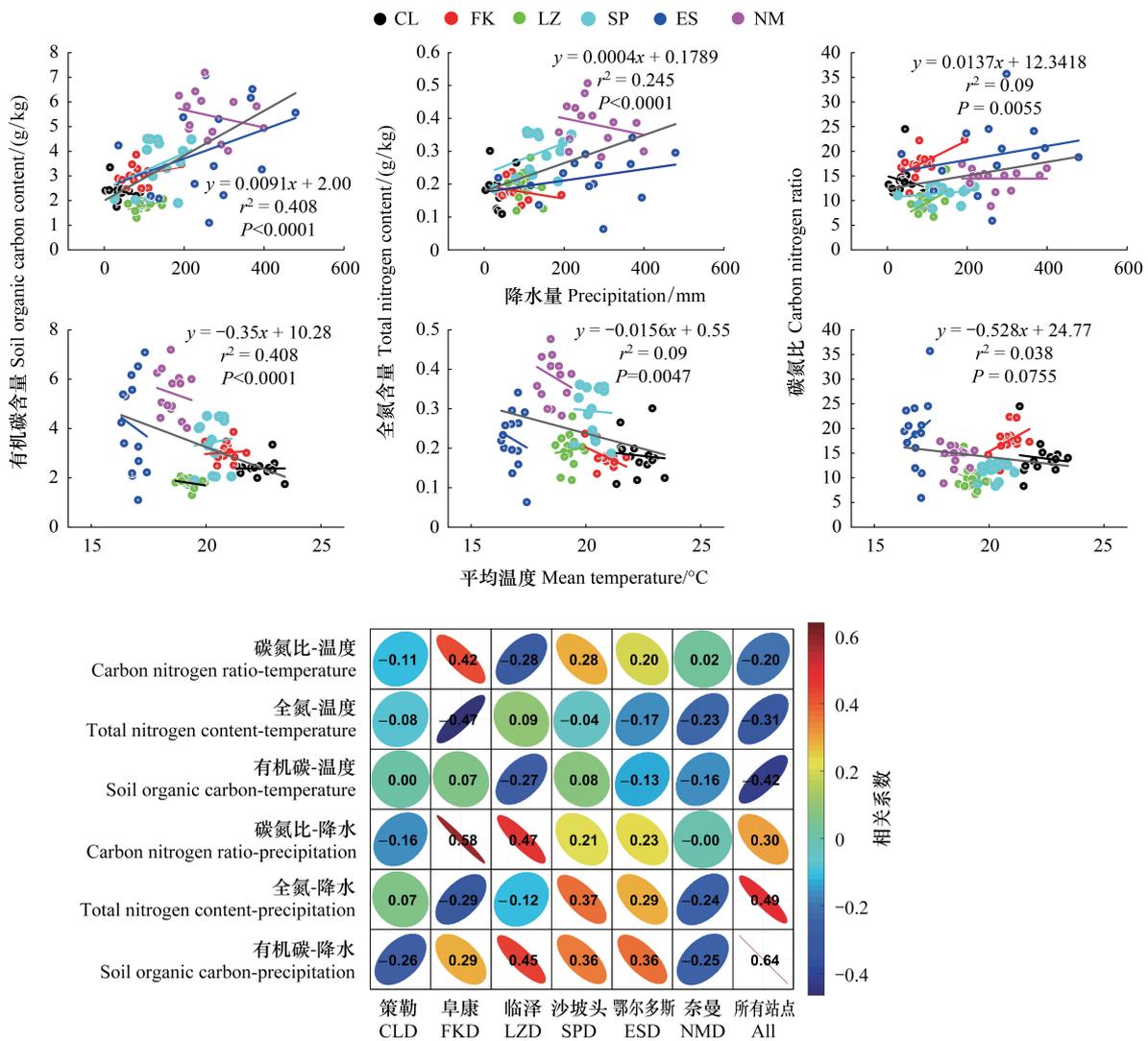


图 4 土壤碳氮特征与降水量和平均温度的关系

Fig.4 Relationship between soil carbon and nitrogen characteristic and precipitation and mean temperature

3 讨论

基于定位站点的长期监测数据能够准确反映生态系统对气候环境等因素的响应和适应状态,多站点联网

研究通过区域对比揭示了不同干旱梯度的变化规律,是准确预测全球气候变化影响下,探究基于地理空间分异的生态系统结构功能变化的重要依据。本研究结果表明,中国旱区生态系统自西向东随着干旱状况的缓解,土壤有机碳和全氮含量表现出增加趋势,这支持了水分有效性是影响旱区生态系统结构功能的主控因子的结论^[17],水分有效性的增加促进了荒漠草原土壤质量提升。对比分析发现,CERN 固定站点土壤碳氮含量高于其他一些研究结果,如本研究中奈曼站综合观测场平均土壤碳氮含量(分别为 5.43 g/kg 和 0.38 g/kg)均远高于 2011 年调查的草地土壤碳氮含量(分别为 1.41 g/kg 和 0.17 g/kg)^[18],这主要因为生态站综合观测场属于固定监测样地,受到人为干扰和放牧等社会活动影响较小,生态系统处于受保护的生态恢复中,土壤碳氮含量高于未受保护区域。如沙坡头站平均土壤碳氮含量(3.45 g/kg 和 0.29 g/kg)与宁夏毛乌素西南缘自 1998 年围封草地土壤碳氮含量(3.63 g/kg 和 0.46 g/kg)^[19]比较接近。可见,生态恢复对土壤有机碳和全氮具有明显的固存效应^[20],但是不同干旱梯度生态恢复的最适年限,多种生态系统功能(如生产力、生物多样性、碳汇功能等)需求下如何度量相互之间的权衡关系,实现生态系统良性发展和价值获取的最大化仍值得探讨。

表层土壤具有最活跃的生物—环境相互作用,研究站点 0—20 cm 平均土壤碳氮比约 14.38,接近于相对变异性较低(约束性好)的表层土壤碳氮比(0—10 cm 土壤碳氮比为 14.4)^[21]和全球土壤碳氮比约为 14.3^[22],奈曼站碳氮比与以上碳氮比相当,表明奈曼站土壤质量处在相对稳定的范围,具有一定的碳汇潜力。此外,退化草地的碳氮比约 17^[8],鄂尔多斯的平均土壤碳氮比高于这个数值,表明虽然鄂尔多斯站土壤碳含量较高,但土壤质量低,植被生长和微生物活动受到氮限制的风险较大。临泽站与策勒站碳氮含量以及碳氮比值均较低,土壤质量较差。土壤有机碳和全氮之间具有密切的相关性^[23],土壤氮影响植物生长,从而改变植被向土壤中的碳输入,同时土壤氮通过生态系统的养分循环,调节碳氮动态^[24]。根据土壤碳氮特征变化趋势综合分析,策勒站、阜康站、鄂尔多斯站可能存在氮限制风险,土壤质量下降;临泽站可能存在碳流失或者氮富集情况;沙坡头站和奈曼站土壤质量有所改善,具有一定的碳汇潜力。各站点平均土壤碳氮比高于或低于区域均值时可能受到氮限制或具有一定碳汇潜力,在土壤有机碳含量较高,而碳氮比较大的区域,生态系统功能可能会受到氮限制的风险;在土壤全氮含量较高,而碳氮比较小的区域,生态系统可能具有一定的增汇潜力,需要根据土壤—植被反馈进一步推演植被生长、凋落物分解和微生物活动对生态系统功能的综合效应。

土壤碳氮含量的变化速率表现为随干旱指数增加而增加,干旱区呈减少趋势,其他区域呈增加趋势,碳氮比没有明显变化规律。沙坡头站和鄂尔多斯站土壤碳氮含量都表现出显著增加趋势,土壤碳氮比只有沙坡头站呈显著增加趋势。基于全球尺度原位观测的 Meta 分析研究表明,干旱对土壤有机碳库和氮库均无显著影响^[11],本研究结果表明气候变化背景下不同干旱程度区域土壤碳氮含量趋势存在差异,这主要与土壤的持水保水能力^[25]、植被生理生态特征^[26—27]和生态系统水分利用效率^[28—29]等要素与环境的相互关联有关。因此,关注环境变化的同时,更要关注生态系统适应能力的变化,尤其是不同类型荒漠草原生态系统(土壤性质、植被类型和生态系统结构不同)沿干旱梯度的响应差异,如对气候响应的敏感性差异(数年尺度),植被演变与群落演替的敏感性差异(数十年到几百年或更长时间尺度)等,因为当这种亚区响应强度超出特定阈值时可能会引起区域生态系统结构功能的状态转变,而这往往在区域尺度上会被掩盖^[30]。

结合生态站气象观测数据的研究结果表明,土壤碳氮特征受到强烈的水热调控,与已有研究结果一致,如,内蒙古地区土壤碳氮蓄积量随温度升高和降水量减少呈降低趋势^[31]。此外,本研究表明土壤碳氮特征沿干旱梯度的敏感性符合环境耐受性曲线(Shelford'law)^[32]规律,越干旱和越湿润的区域对降水量变化的敏感性较低,而干旱程度中等区域对降水量变化的敏感性较高,对温度变化的敏感性没有明显规律,验证了环境因子对生态系统影响的耐受定律。土壤碳氮比对气候变化响应敏感性最高,其次是土壤有机碳含量,土壤全氮含量敏感性最低。气候变化过程中降水与温度变化的相对幅度将影响土壤碳氮特征的平衡,长期监测土壤碳氮特征的气候敏感性的时空变化,将为准确评估和预测土壤质量和生态系统健康提供科学依据,对实现碳中和目标和生态恢复管理具有重要参考意义。

4 结论与展望

(1) 我国西北干旱区自西向东随着干旱程度的降低,土壤有机碳和全氮含量增加,土壤有机碳对干旱变化的敏感性增加,而土壤全氮对干旱变化的敏感性则减小。土壤碳氮比过大时,生态系统功能有受到氮限制的风险,土壤碳氮比过小时,可能具有增汇潜力。

(2) 2005—2018年,土壤碳氮含量和碳氮比随时间的演变趋势不同,半湿润区和半干旱区碳氮含量都表现出增加趋势,土壤质量改善;干旱区土壤质量变化不大,由于氮含量的降低,可能加剧土壤氮限制对生态系统结构功能的影响。

(3) 土壤碳氮含量与碳氮比均与降水呈显著正相关,与温度呈显著负相关,表现出明显的水热控制特征。土壤碳氮特征对降水量敏感性沿干旱梯度先增加后减小,对温度的响应没有明显干旱梯度效应。土壤碳氮比、有机碳含量和全氮含量对降水和温度响应的敏感性依次降低。

气候变化尤其是温度和降水综合作用下的干旱梯度,将会增强土壤碳氮特征对气候变化敏感性的差异,未来需基于站点长期监测数据,探索土壤-植被-大气连续体的元素循环和养分平衡,深入理解生态系统演化及其对气候变化的响应规律,进一步,在联合国可持续发展目标的土地退化评估指标中,提出从面积比例向面积—养分—元素多指标综合监测评估,进而探究生态-社会-经济综合影响下的全球土地/土壤演变与机制,这对支撑旱区生态系统土地退化可持续管理和缓解气候变化的生态恢复增汇措施具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] Sharrow S H, Ismail S. Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA. *Agroforestry Systems*, 2004, 60(2): 123-130.
- [2] 方精云, 杨元合, 马文红, 安尼瓦尔·买买提, 沈海花. 中国草地生态系统碳库及其变化. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 566-576.
- [3] Poulter B, Frank D, Ciais P, Myeni R B, Andela N, Bi J, Broquet G, Canadell J G, Chevallier F, Liu Y Y, Running S W, Sitch S, van der Werf G R. Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. *Nature*, 2014, 509(7502): 600-603.
- [4] Ahlström A, Raupach M R, Schurgers G, Smith B, Armeth A, Jung M, Reichstein M, Canadell J, Friedlingstein P, Jain A K, Kato E, Poulter B, Sitch S, Stocker B, Viovy N, Wang Y P, Wiltshire A, Zaehle S, Zeng N. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. *Science*, 2015, 348: 895-899.
- [5] Walker T, Adams A. Studies on soil organic matter: I. Influence of phosphorus content of parent materials on accumulations of carbon, nitrogen, sulfur, and organic phosphorus in grassland soils. *Soil Science*, 1958, 85: 307-318.
- [6] Yang Y H, Luo Y Q. Carbon: nitrogen stoichiometry in forest ecosystems during stand development. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20: 354-361.
- [7] Sterner R W, Elser J J (2002). *Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere*. Princeton University Press, Princeton.
- [8] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [9] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 2-6.
- [10] 谭向平, 申卫军. 降水变化和氮沉降影响森林叶根凋落物分解研究进展. *生态学报*, 2021, 41(2): 444-455.
- [11] 郑雅晶, 邹建文, 刘树伟. 旱地生态系统碳氮过程对干旱响应与反馈的 Meta 分析. *南京信息工程大学学报: 自然科学版*, 2022, 14(1): 1-10.
- [12] 许华, 何明珠, 孙岩. 不同降水控制对荒漠土壤中可溶性碳、氮组分的影响. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2018, 54(6): 798-803.
- [13] 宋一凡, 卢亚静, 刘铁军, 刘慧文, 闫泽宇, 王慧琪. 荒漠草原不同雨量带土壤-植物-微生物 C、N、P 及其化学计量特征. *生态学报*, 2020, 40(12): 4011-4023.
- [14] 张欣, 任海燕, 韩国栋. 增温和施氮对内蒙荒漠草原土壤团聚体稳定性及碳含量的影响. *草原与草业*, 2020, 32(2): 22-26.
- [15] 卢同平, 张文翔, 武梦娟, 林永静. 干湿度梯度及植物生活型对土壤氮磷空间特征的影响. *土壤*, 2017, 49(2): 364-370.
- [16] Zhao W, Yu X B, Liu Y, Xu L, Chen Z, Li S G. Distinct vegetation response to drying and wetting trends across an aridity threshold. *Environmental Research Communications*, 2021, 3: 025002.
- [17] Smith W K, Dannenberg M P, Yan D, Herrmann S, Barnes M L, Barron-Gafford G A, Biederman J A, Ferrenberg S, Fox A M, Hudson A,

- Knowles J F, MacBean N, Moore D J P, Nagler P L, Reed S C, Rutherford W A, Scott R L, Wang X, Yang J L. Remote sensing of dryland ecosystem structure and function: progress, challenges, and opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111401.
- [18] 韩娟娟, 李玉强, 王少昆, 罗永清, 连杰. 奈曼旗几种主要土地类型土壤碳氮特征. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(1): 37-42.
- [19] 黄菊莹, 余海龙, 刘吉利, 马飞, 韩磊. 控雨对荒漠草原植物、微生物和土壤 C、N、P 化学计量特征的影响. *生态学报*, 2018, 38(15): 5362-5373.
- [20] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复中土壤碳氮变化规律. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 66-74.
- [21] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/2/3): 139-151.
- [22] Cleveland C C, Liptzin D. C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [23] Luo Y Q, Su B, Currie W S, Dukes J S, Finzi A, Hartwig U, Hungate B, McMurtrie R E, Oren R, Parton W J, Pataki D E, Shaw R M, Zak D R, Field C B. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide. *BioScience*, 2004, 54(8): 731-739.
- [24] Burton J, Chen C R, Xu Z H, Ghadiri H. Gross nitrogen transformations in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(2): 426-433.
- [25] 李新荣, 赵洋, 回嵘, 苏洁琼, 高艳红. 中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述. *地理科学进展*, 2014, 33(11): 1435-1443.
- [26] 刘进辉, 王雪芹, 马洋. 沙漠绿洲过渡带怪柳灌丛沙堆-丘间地系统土壤养分空间异质性. *生态学报*, 2016, 36(4): 979-990.
- [27] 刘深思, 徐贵青, 李彦, 吴雪, 刘杰, 米晓军. 5 种沙地灌木对地下水埋深变化的响应. *生态学报*, 2021, 41(2): 615-625.
- [28] 张海娜, 苏培玺, 李善家, 周紫鹃, 解婷婷, 赵庆芳. 荒漠区植物光合器官解剖结构对水分利用效率的指示作用. *生态学报*, 2013, 33(16): 4909-4918.
- [29] 刘婵, 刘冰, 赵文智, 朱钊岑. 黑河流域植被水分利用效率时空分异及其对降水和气温的响应. *生态学报*, 2020, 40(3): 888-899.
- [30] Ryo M, Aguilar-Trigueros C A, Pinek L, Muller L A H, Rillig M C. Basic principles of temporal dynamics. *Trends in Ecology & Evolution*, 2019, 34(8): 723-733.
- [31] 陈庆美, 王绍强, 于贵瑞. 内蒙古自治区土壤有机碳、氮蓄积量的空间特征. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 699-704.
- [32] Erofeeva E A. Plant hormesis and Shelford's tolerance law curve. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32(5): 1789-1802.