基于 DNDC 模型的甘南高寒草甸土壤总氮 密度模拟研究

张锐祺,张美玲*,田景,王晨,李钊

(甘肃农业大学理学院,数量生物学研究中心,甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】对土壤总氮密度进行模拟,探究1993-2022年甘南州高寒草甸近30年土壤总氮密 度的变化规律及其影响因素。【方法】采用克里金差值法分析土壤总氮密度的空间动态分布,利用单因 素方差分析、相关分析和主成分分析方法探讨土壤总氮密度与不同土层、环境因素之间的相关关系及 其影响因素。【结果】甘南州高寒草甸土壤总氮密度30年间波动较大,2005年之前呈波动上升趋势, 2005年达到最大值92410.05 kg/hm²,之后呈下降趋势。在空间分布上,由西向东逐渐减少。其中玛 曲的总氮密度最高,其次是夏河和碌曲,最低的是迭部和舟曲。土壤总氮密度随土层深度的增加而逐 渐降低,其中0~10 cm 土层总氮密度呈增加趋势,由4823.14 kg/hm²增加到5093.29 kg/hm²,10~ 20 cm 和20~30 cm 土层总氮密度均有所减少,10~20 cm 土层总氮密度由3874.14 kg/hm²减少到 3699.41 kg/hm²,20~30 cm 土层总氮密度由2845.59 kg/hm²减少到2725.41 kg/hm²。【结论】土壤 总氮密度与不同土层之间呈显著正相关,且随着土层深度的增加而显著减小,各研究站点之间的年均 温度存在显著差异,温度越高,土壤总氮密度越低,与年均降水量的相关性相反。海拔高度、有机碳含 量和黏土比例与土壤总氮密度呈显著正相关,土壤容重、pH值和土壤含水量与土壤总氮密度呈负相 关。该研究对生态系统的保护具有重要的意义,为甘南地区草地管理提供科学依据。

关键词:土壤总氮密度;高寒草句;DNDC模型;时空分布;甘南 中图分类号:S812.2 文献标志码:A 文章编号:1009-5500(2025)01-0115-13 DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2025.01.014



全球变暖是世界各国共同关注的问题,不仅影响 自然生态系统的平衡,而且导致陆地生态系统格局发 生一系列严重变化,如生态系统退化、陆地荒漠化、生 物多样性减少等^[1]。陆地生态系统作为全球变暖过程 中的主要渠道,已成为生态学研究的热点^[2]。其中, N₂O是导致变暖效应的主要温室气体,对全球变暖的 贡献率达到了6.1%^[3]。因此,研究土壤氮及其循环机

收稿日期:2024-02-05;修回日期:2024-03-05

- 基金资助:国家自然科学基金项目(32260353);科技部高端外国专家引进计划(G2022042009L)
- 作者简介:张锐祺(1999-),男,陕西铜川人,硕士研究生。 E-mail:1129922569@qq.com *通信作者,研究方向为环境与生态统计。

E-mail:zhangml@gsau.edu.cn

制对温室效应、臭氧空洞等全球变化问题具有重要意义。土壤氮是评价草地生态系统服务功能的重要指标,其储量影响着整个生态系统的氮循环和生态系统的结构与功能^[4]。土壤氮的空间分布主要集中在不同 区域尺度、不同土壤养分和土壤类型上^[5]。

近年来,由于人类活动和气候变化的影响,青藏 高原出现了大面积的高寒草甸退化现象,进一步导致 了青藏高原生态系统功能的恶化,严重威胁到青藏高 原及其下游地区的生态安全和可持续发展^[6]。甘南位 于青藏高原的东部,其高寒草甸中的物种资源丰富且 数量繁多,不但是我国畜牧业的重要基地,而且在维 护全球生物多样性的过程中发挥了重要作用^[7]。

土壤的空间异质性作为土壤的基本属性,也是产 生空间格局的主要原因,与生态系统的功能和过程密 切相关^[8]。土壤氮素是陆地生态系统主要的限制元 素,主要以有机氮的形式存在,其含量的多少不仅会 影响植物光合作用和初级生产过程,而且也可以用于 评价生态系统的生产力^[9]。关于土壤氮的研究是生态 系统营养结构变化、生物多样性和地球化学循环的 基础。

DNDC 模型是一种模拟生物地球化学循环的模 型,不仅可以模拟农田生态系统的动态变化[10],还可 以用于估计气候变化、土地利用、农业管理、土壤性质 和大气氮沉降对土壤C和N动态的影响[11],模型不但 具有预测所有三种陆地温室气体通量的能力,还可以 高效模拟生态系统的碳氮排放与农作物产量等自然 过程^[12]。刘放等^[13]总结了DNDC模型在生态系统实 际应用中的主要研究进程和不足之处,提出该模型在 不同环境类型下的应用前景。谢海宽等[14]通过对 DNDC模型的不断改进和优化,开发出了适合中国农 业生态系统的模型版本,并提高了模型在不同生产管 理模式下的覆盖范围。成思潮等^[15]利用 DNDC 模型 探讨了多因素对模拟 N₂O 排放的敏感性。张世航 等^[16]分析了环境变化样地下 DNDC 模拟值与现场观 测值的对应关系,探讨了该模型在温室气体预测中的 潜力。Li等^[17]人利用DNDC模型,模拟了中国内蒙古 典型草原区土壤氮储量的变化。

高寒草甸是中国草地生态系统主要的植被类型, 伴随着人类活动的影响和自然环境的不断加剧,高寒 草甸的植被和土壤均呈现出不同程度的退化趋势^[18]。 本研究利用甘南高寒草甸实测数据将DNDC模型参 数本地化,基于该模型模拟甘南州高寒草甸近30年来 土壤氮密度及其时空分布,对其影响因素进行了分 析,同时也对影响研究区土壤总氮水平的环境因子进 行了评价。研究结果对甘南州草地生态系统的有效 管理具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

甘南藏族自治州位于100°46′~104°44′E,33°06′ ~36°10′N^[19],地处甘肃省西南部,青藏高原、黄土高 原和陇南山地的过渡地带,地势西北高,东南低,由西 北向东南呈倾斜状;甘南州年均温1.1~12.7℃,属于 高寒地区,气候变化大,年降水量400~800 mm,属大 陆性气候^[20]。地理分布差异显著,海拔高度由西向东 减小,生态环境脆弱。土壤类型主要包括高寒草甸 土、亚高寒草甸土、草甸土、沼泽土、高寒栗钙土、高寒 黑钙土6类。甘南州总土地面积4.5万km²,其中草地 面积4084.9万亩,草地生态系统主要以草原与草甸 为主^[21],占总土地面积的70.28%^[22]。全州草地资源 丰富,植被类型多样,草地畜牧业是甘南州的经济 主体^[23]。



甘南研究区共分为七县一市,共8个地区。其中 玛曲县海拔3300~4806 m,年均温2.9 °C,年降水量 为3.17 mm,气候寒冷阴湿,草地面积占甘南州的 33.44%;碌曲县属青藏高原气候带高原湿润气候区, 冬长无夏,春秋短促,年均温2.3 °C,年降水量 1.71 mm,草地面积占甘南州的18.14%;卓尼县年均 温5.6 °C,最高气温33.5 °C,最低气温-19.2 °C,年降 水量1.61 mm;夏河县地处青藏高原东北边缘,地势 由西北向东南倾斜,海拔在3000~3800 m,年均温 2.6 °C,年降水量1.35 mm;迭部、舟曲、临潭等地海拔 偏低,人类活动更为密集,平均海拔在2000 m左右, 年均温6.46 °C,年降水量1.52 mm,平均草地面积约 占甘南州的3.91%。

1.2 数据来源

1.2.1 土壤采样及测定 土壤容重、土壤含水率、土 壤pH值以及地上地下生物量均由野外试验获得。于 2023年8月底进行了为期一周的野外采样,共选取了 30个采样点,GPS定位工具获取海拔与经纬度信息, 每个采样点设置3个5m×5m的随机样地。首先清 除表层土壤的杂质,再使用环刀自上而下分层取0~ 10、10~20、20~30 cm的土样,每个样点共重复3次取 样工作。为了避免水分蒸发,每一次环刀取样的土壤 样品全部封装在自封袋内,带回实验室统一测定土壤 含水率、土壤容重以及pH值。取至少40g土样装入 55mm×35mm的铝盒中,称重并在铝盒上进行标记, 将所有土样全部装完后,在实验室的烘箱中进行处 理,设置温度为80℃,时长24h,待样品烘干后取出称 其干重并进行实验记录,随后计算土壤含水量与土壤 容重。

去除地面的表土,使用根钻垂直插入土壤中,自 上而下分别取0~10、10~20、20~30 cm的土样,将根 钻中不同土层的土壤装入不同的自封袋并进行标记, 带回实验室后首先进行晾晒,再使用0.15 mm的筛网 对土样中的杂质进行筛除并装入新的自封袋中,每个 样品选取500 mg左右的土样放入烘干槽中并进行记 录,称样完成后,按照顺序将烘干槽放入元素分析测 定仪(Skolar[®], Primacs SNC ho-IC-E)中对全氮含 量进行测定。

1.2.2 基础数据获取 本研究所需气象数据下载自

国家气象科学数据中心网站(http://data.cma.cn/), 从中获取全国气象站点,利用甘南研究区矢量边界, 通过ArcGIS10.8软件提取出甘南研究区的气象站 点,并且从该网站的国家气象科学数据中心中国地面 气候资料日值数据集中获取了1993-2022年甘南研 究区气象站点的逐日最高气温、最低气温和平均降水 数据。

本研究选取了中国科学院资源环境科学与数据 中心(https://www.resdc.cn/)中1km的土壤类型栅 格数据,是根据全国土壤普查办公室1995年编制并出 版的《1:100万中华人民共和国土壤图》数字化生成。 利用ArcGIS10.8软件裁剪出甘南研究区的土壤类型 分布的栅格数据。本研究中的土壤数据源自世界土 壤数据库V1.2(http://www.fao.org/),该数据库中 的土壤质地数据提供了土壤理化性质等信息,根据实 测采样站点的经纬度,利用ArcGIS10.8软件对各个 站点的土壤信息进行提取,土壤信息包括砂砾含量、 粉砾含量、黏土含量、容重及砾石含量(表1)。

区县	砂砾/%	粉砾/%	黏土/%	容重/(g•kg ⁻¹)	≥2mm砾石含量(体积比)
卓尼	46	34	20	1.420	0.100
临潭	46	36	20	1.420	0.240
夏河	35	45	20	1.400	0.060
碌曲	35	45	20	1.400	0.020
合作	38	39	23	1.590	0.100
玛曲	38	39	23	1.380	0.020
舟曲	41	37	22	1.350	0.100
迭部	41	37	22	1.400	0.060

表 1 甘南各地土壤环境条件与主要理化性质 Table 1 Soil environmental conditions and main physical and chemical properties in Gannan Province

利用公式(1)将实测土壤全氮含量(N)数据进行转换:

 $TND = \sum_{i=1}^{3} N_i \times \theta_i \times D_i \times (1 - \delta_i)/100 \quad (1)$ 式中: TND 为土壤总氮密度(kg/m²); N_i为第 i 层的土 壤全氮含量(g/kg¹); \theta_i为第 i 层的土壤容重(g/cm³); D_i为第 i 层的土层厚度(cm); \delta_i为第 i 层直径>2 mm 的砾石含量(体积百分数)。本研究将土层分为3层, 每层土层厚度为10 cm。

1.3 研究方法

1.3.1 DNDC 模型 DNDC 模型由两部分组成:第 一部分包括土壤气候、作物生长和有机质降解三个子 模型,主要通过输入气象、土壤、植被和作物田间管理 参数,模拟植被土壤系统中土壤温度、湿度、pH等环境 因子;第二部分包括硝化过程、反硝化过程和发酵三 个子模型,主要模拟植被土壤系统微生物活动对土壤 环境因子的响应,并计算二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄) 和氧化亚氮(N₂O)等温室气体通量的排放。图2是 DNDC模型的原理示意图,模型运行的结果将被记录 在指定的文件目录中,生成12个文件,主要包含土壤、 作物、温室气体等相关信息。DNDC模型目前可以有 效地用于评估各种农业实践的碳氮及其减排 潜力^[24]。

DNDC作物模型作为地球的生化模型,非常重视 土壤的理化性质,对土壤参数的变化比其他模型更为





敏感^[25]。在使用模型进行预测模拟时,需要相关土壤 参数和土壤动态变化参数具有较高的准确性,以保证 模型模拟预测的准确性^[26]。因此,通过调整每一步的 参数使初始化结束时的模拟值接近实测值,进而得到 一个本地化的DNDC模型。

1.3.2 参数设置 确定合适的参数对模型的准确性 至关重要,由于模型参数的复杂性,本文所用的气象 数据格式包括日最高气温、最低气温和平均降水量, 提前根据DNDC模型格式整理为文本格式并保存在 指定目录位置。模型中的主要土壤输入参数,其中土 壤容重、酸碱度均为实地测量获取,其他土壤数据根 据从土壤数据库中提取的数据来确定,从而对应模型 中设定好的土壤质地,模型中会自动给出其他土壤性 质的默认参数。作物的种类根据样地实际作物的情 况选择对应的种类,模型会给出该物种对应的生长参 数,其次再根据实际情况对部分参数进行适当地调 整。其余相关的参数在每次模型运行的过程中,根据 多次不同的模拟结果与野外实测数据进行对比,并参 考前人^[27-28]的研究对各个参数进行手动调试,最终得 到了适用于甘南高寒草甸的主要参数设置(表2)。

1.3.3 统计方法 本研究采用克里金插值法对研究 区土壤总氮密度的空间分布进行差值。模型模拟的 精度通过线性回归方程及 Pearson 相关系数 R 和纳什 系数 NSE 来综合验证。

纳什系数的计算公式:

$$NSE = 1 - \sum_{i=1}^{n} (X_i - Y_i)^2 / \sum_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X})^2$$
(2)

式中:X_i为实测值;Y_i为模拟值;X为实测值的总 平均;n为样本量的个数。NSE的取值为负无穷至1, NSE接近1,表示模型具有较高的可靠性;NSE接近 于0,则表示模拟结果接近实测值的平均水平,即模型 总体结果可靠;如果NSE远小于0,则模型不可靠。

利用单因素方差分析法对试验数据进行分析。 采用 SPSS 26.0进行单因素方差分析,用 R4.3.1软件 计算 Pearson 相关系数,图表制作和相关分析均由 Origin 64软件完成,其空间分布图在 ArcGIS 10.8软件中 绘制。

2 结果与分析

2.1 模型验证

模拟值与实测值的拟合回归结果表明,模型模拟 值与实测值拟合较好(图3),本地化后的DNDC模型 能较好地模拟甘南高寒草甸土壤总氮密度。纳什效 率系数的计算结果显示,土壤总氮密度实测值与模拟 值的模拟效率为0.92,接近于1,说明模型的质量好, 可靠性高。

2.2 时间尺度的土壤总氮动态变化

不同土层下土壤总氮密度的变化差异显著(图 4)。0~10 cm 土层的总氮密度在 1993-1997 年呈上 升趋势,1997-2001年呈现较相对稳定的稳定趋势, 之后开始出现波动,并逐年上升,2005年达到了最大 值 40 746.3 kg/hm²,随后逐年递减,30年内呈下降的 趋势(图 4-A);近 30 年来, 10~20 和 20~30 cm 土层总 氮密度呈现先降后升的趋势,并在2001年达到极值, 最小值分别为 29 452.62 kg/hm²和 21 761.72 kg/hm²,与0~10 cm的变化相对相反,但总体呈上升 趋势(图4-B、4-C);土壤总氮密度总体变化呈先增加 后减少的趋势,但波动明显,1993-2005年呈较剧烈 的波动上升趋势,2005年达到最大值92410.05 kg/hm²,次年迅速下降,随后又呈波动下降趋势(图4-D)。0~10 cm 土层总氮密度占土壤总氮密度的 42.66%,10~20 cm 土层和 20~30 cm 土层总氮密度 分别占土壤总氮密度的 32.76% 和 24.09%。相比之

参数类别	参数名称	参数值	参数说明
	Site	Maqu	站点
研究区站点位置	Latitude	34	站点纬度
	Simulated years	30	模拟年份
	Land—use	湿润的草原	土地利用
	Texture	砂质粘壤土	土壤质地
	Bulk density	1.27	土壤容重(g•cm ⁻³)
	Soil pH	6.4	土壤pH
土壤	Field capacity	0.52	田间持水量
	Conductitivity	0.0227	电导率
	Porosity	0.421	孔隙度
	Wilting point	0.24	萎蔫点
	SOC at surface soil	0.4411	表层土壤有机碳
	Number of crops	1	作物数量
	Crop type	多年生草	类别
Un that	Cover crop	是	是否覆盖作物
作物	Planting month	3月1日	种植日期
	Harvest month	8月31日	收获日期
	Transplanting	否	是否移植
	Applications	10	施肥次数
施肥	Manure	农家肥	肥料类别
	Solid C/N ratio	5	碳氮比
	Applications	5	放牧次数
	Grazing hours per day	6	每天放牧时长
->	Beef/veal	30	牛
J1X +1X	Sheep	50	羊
	Horse	5	프
	Excreta handle	留在田里	粪便处理

表 2 DNDC 模型参数本地化 Table 2 DNDC model parameter localization





下,0~10 cm 土层总氮密度的波动幅度与土壤总氮密 度的波动幅度相似。从不同区域来看,玛曲大部分地 区近30年来总氮密度处于最高水平,达到17771.36 kg/hm²,而玛曲地区总氮密度自1993年以来有所下 降。迭部和舟曲地区总氮密度一直保持最低,分别为 4 682.33 kg/hm²和 8 544.17 kg/hm²。不同区域按总 氮密度由大到小的顺序可排列为:玛曲、夏河、碌曲、 卓尼、合作、临潭、迭部、舟曲。

2.3 土壤总氮密度的空间分布

从空间分布来看土壤总氮密度的高值区主要集 中在玛曲、碌曲和夏河三个区域(图5)。1993-2022 年研究区土壤总氮密度空间分布存在显著差异。土 壤总氮密度最高的地区主要集中在甘南州西部,其次 是西北部,较低的地区主要集中在甘南州东部地区。

自1993年以来,不同土层之间总氮密度的空间变 化也存在差异性,密度较高的地方仍然分布在甘南西 北部,而密度较低的地方主要集中在东部地区,总体





趋势仍保持自西向东逐渐递减。经过30年,各土层的 总氮密度都发生了不同程度的变动,0~10 cm 土层的 总氮密度从4823.14 kg/hm²增加到5093.29 kg/hm², 到2022年,甘南州西部地区0~10 cm 土层的总氮密度 明显增加,而临潭、迭部、舟曲地区明显有所减少。 10~20 cm 土层总氮密度由3874.14 kg/hm²下降到3 699.41 kg/hm²,20~30 cm 土层总氮密度由2845.59 kg/hm²下降到2725.41 kg/hm²,明显下降的区域主要 集中在中部(图6)。

2.4 土壤总氮密度的影响因素分析

2.4.1 不同区域的土壤总氮密度对比分析 各地区的土壤总氮密度随土层深度的增加而减少,在同一地区,不同土层之间的土壤总氮密度差异显著(P<0.05);在同一土层,不同地区之间的土壤总氮密度也存在显著性的差异(P<0.05)。</p>

2.4.2 气候因子对土壤总氮密度的影响 甘南研究 区的年均温呈东部高,西部低的分布格局,舟曲、临潭 和迭部的年均温度较高,分别为7.26 ℃、6.47 ℃和 5.64 ℃,合作的年均温度最低,低至0.87 ℃(图8-A)。 过去30年内研究区的温度在一定范围内出现波动,即 在2℃上下浮动,但总体呈现波动上升的趋势,且上升 较为明显,相较于年均温度最低的1994年,2022年的 年平均温度已经增加了1.3℃(图8-B)。

甘南州的降水量呈现出由东北向西南逐渐递增的 趋势,其中年均降水量最多的地区是玛曲(1.83 mm), 年均降水量最少的地区是合作(1.27 mm)(图 9-A)。 近 30 年来甘南研究区年均降水量呈上升趋势,且上升 比较明显,年均降水量几乎上涨了1 mm,其年均降水 量的最大值为2021年的1.91 mm,最小值为1999年的 1.44 mm,平均值为1.58 mm(图 9-B)。

年均温(MAT)和年均降水量(MAP)的波动变 化均对不同土层的土壤总氮密度产生显著的影响,年 均温与土壤总氮密度存在较弱的负相关关系,与20~ 30 cm 土层土壤总氮密度不存在相关关系,而年平均 降水与土壤总氮密度存在极其显著的正相关关系 (*P*<0.001)。年均温对0~10 cm 土层的土壤总氮密 度影响较为明显,相关系数为0.4(图10)。

不同土层,土壤总氮密度与各土层之间两两呈显 著正相关,相关系数接近于1,0~10 cm 土层对土壤总 氮密度影响较为明显,相关系数为1。

2.4.3 土壤理化性质等环境因素对土壤总氮密度的 影响 海拔高度与研究区土壤总氮密度之间均存在 极显著的正相关关系(P<0.001),最大相关系数为 0.65;其次是有机碳含量,最大相关系数为0.46;黏土





审图号: GS(2016)2923号



比例与研究区土壤总氮密度之间存在显著的正相关 关系(P<0.001),最大相关系数为0.19;土壤容重和 pH与研究区土壤总氮密度之间存在极显著的负相关 关系(P<0.001),最小相关系数分别为-0.29和 -0.35;土壤含水量与总氮密度存在极显著的负相关 关系(P<0.001)(图11)。

3 讨论

3.1 研究结果与意义

3.1.1 土壤总氮密度的分布变化 DNDC模型在点 水平上有许多成功的案例,因此利用DNDC模型模拟 草地点水平的氮储量可以进一步验证该模型在草地



审图号: GS(2016)2923号

图 6 1993-2002年甘南高寒草甸不同土层下的总氮密度变化 Fig. 6 Changes in total nitrogen density under different soil layers in Gannan alpine meadow from 1993 to 2002

生态系统中的适用性^[29]。从时间变化来看,近30年来 甘南州牧区各县市草地均呈现严重退化趋势,其中玛 曲县草地退化最为严重,退化草地面积占总草地面积 的72.03%。舟曲县草地退化面积尽管占比最小,但 也达到28.05%,牧区草地退化情况不容乐观^[30]。李 强等^[31]通过对退化盐碱草地围封与放牧的时间序列 比较,研究了土壤碳、氮、磷储量及其变化与放牧管理 的关系,发现放牧条件下表层土壤碳、氮、磷储量先增 加后减少,这与本研究中土壤全氮先增加后减少的结 论是一致的。白云晓等^[32]利用DNDC模型模拟了植 被土壤系统的氮储量,并对结果进行了验证,结果表 明该模型在模拟草地土壤氮储量方面具有较好的效 果。林伟山等^[33]研究了土壤养分含量与气象因子相 关关系,结果发现土壤 0~15 cm 土层中硝态氮和速效



第45卷

第1期



Fig. 7 Total soil nitrogen density in each soil layer from 0 to 30 cm at the study site

注:大写字母表示同一时期的不同土壤类型下气体流量差 异显著(P<0.05),小写字母表示同一土壤类型下不同时期的 气体流量差异显著(P<0.05)。

氦分别与平均气温、降水量呈显著正相关(P<0.05)。 从空间分布上看,甘南州总体上呈现西高东低的趋



势。随着经度的增加,土壤全氮逐渐减少,这与贾晓 楠和张瑶瑶^[27-28]的结论一致,也验证了DNDC模型与 CENTURY 模型的显著性差异,为后续研究提供了很 好的对比。李启权等^[34]分析了表层土壤全氮(A层) 与环境因子的相关性,并结合多元回归模型和HASM 模型模拟了中国全国范围内表层土壤全氮的空间分 布格局。此外,有研究表明,不同土层的氮含量变化 也很明显,随着土层深度的增加,土壤的氮含量越来 越少。任建新等[35]利用地质统计学方法研究了陇西 县土壤氮的空间分布特征,并计算了该地区的氮储 量,结果表明:0~10、10~30 cm 土层氮储量分别占0~ 50 cm 土层氮储量的 35.97% 和 7.06%,本研究中,0~ 10 cm 全氮占土壤全氮的 42.66%,虽然差异较大,但 仍可以证实,随着土壤深度的增加,土壤全氮含量逐 渐减少。同样,魏巍等^[36]在探究草地利用方式对高寒 草甸植被的影响中也得到了这一结论。朱航勇等[37]









图 9 甘南研究区 1993-2022 年年平均降水的分布与时间变化

Fig. 9 Distribution and temporal variation of annual mean precipitation in the Gannan study area from 1993 to 2022



图 10 土壤总氮密度与气候因子的 Pearson 相关分析







注:ASL海拔;SWC 土壤含水量;BULK 土壤容重;SOC 土壤有机质含量;Clay 黏土比例;TN 土壤全氮。

对梅州林地土壤氮储量及空间分布特征进行了分析, 结果表明,土壤全氮含量总体呈东高西低的分布格 局,并随着土壤深度的增加而逐渐降低。杨天成等^[38] 研究发现0~10 cm 表层土壤有机质含量显著高于其 他土层,以上结论均与本文的研究结果一致。

3.1.2 影响因素的研究分析 本研究探讨了土壤理 化性质和气候因子对土壤总氮密度的影响,相关分析 方法表明,气候因子与土壤总氮密度具有非常显著的 相关性。罗帅伟^[39]研究发现表层土壤全氮(0~20 cm) 主要受土壤性质和生物因子的影响,土壤容重和地上 生物量是驱动土壤全氮变化的主导因子,土壤全氮 (20~50 cm)主要受气候和生物因子的影响。王淑平

等[40]研究发现,降雨和温度是影响土壤有效氮含量的 主要限制因子,降水和温度对土壤有效氮含量具有正 交互作用。姚世庭等[41]连续4年模拟增温,研究青藏 高原高寒草地生态系统氮库的动态变化,发现模拟增 温处理植株氮素含量显著高于对照(P<0.05)。土壤 氮含量和微生物量氮含量均低于对照,但差异不显 著,说明高寒草甸氮对温度的响应更强。史作民等[42] 对内蒙古鄂尔多斯地区4种主要植物群落类型土壤碳 氮特征进行了研究,结果表明,不同群落0~10 cm和 10~20 cm 层土壤全氮含量的季节变化多表现为显著 水平。舒敏等[43]研究发现,三江源区土壤表层氮的空 间分布主要受海拔高度的影响,土壤总氮密度随海拔 高度的升高先升高后降低,与海拔高度、植被多样性、 地下生物量、土壤含水量和土壤pH值等因素密切相 关。袁杰等[44]深入探讨了不同草地类型下土壤碳氮 含量的影响因素,发现土壤理化指标在30 cm 土层深 度基本发生显著变化。由回归模型可以看出,由于人 类活动的影响,耕地土壤碳氮含量受土壤理化指标的 影响较小。其次,人类活动也是影响土壤氮含量的重 要因素,如燃料燃烧、氮肥施用、养牛、氮植物种植和 畜牧业集约化经营等是全球活性氮增加的主要原因。 草地利用方式的变化(开垦、放牧)主要通过影响土壤 氮储量来影响草地生态系统的氮循环^[45]。

4 结论

通过本地化后的 DNDC 模型非常适用于甘南高 寒草甸的植被生态系统。甘南高寒草甸土壤总氮密 度在时间尺度上表现为先增加后减少的趋势;不同区 域的总氮密度按由大到小的顺序可排列为:玛曲、夏 河、碌曲、卓尼、合作、临潭、迭部、舟曲,其在空间分布 上呈现出西高东低的特征,不同土层之间氮密度的空 间变化也存在显著的差异性,并且土壤总氮密度的空 间变化也存在显著的差异性,并且土壤总氮密度随着 土层深度的增加而显著减小。气候因素分析中,年均 温与土壤总氮密度存在较弱的负相关关系,年均降水 量与土壤总氮密度存在极其显著的正相关关系(P< 0.001)。环境因素中,海拔高度、有机碳含量和黏土 比例均与总氮密度之间存在显著的正相关关系(P<

参考文献:

- [1] 陈哲,金艳霞,孙建,等.全球变暖对高寒冻土区温室气体 通量影响研究进展[J].草地学报,2023,31(4): 929-942.
- [2] 沈瑞昌,徐明,方长明,等.全球变暖背景下土壤微生物呼吸的热适应性:证据、机理和争议[J].生态学报,2018,38
 (1):11-19.
- [3] 张若玉.长寿命温室气体 CH₄、N₂O 的辐射强迫和全球增 温潜能的研究[D].南京:南京信息工程大学,2011.
- [4] 付伟,武慧,赵爱花,等.陆地生态系统氮沉降的生态效应:研究进展与展望[J].植物生态学报,2020,44(5):475-493.
- [5] Wang Z G, Wang G C, Zhang G H, et al. Effects of land use types and environmental factors on spatial distribution of soil total nitrogen in a coalfield on the Loess Plateau, China[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 211:105027.
- [6] 刘旻霞,刘成,杨春亮.甘南高寒草甸退化对植物功能群物种多样性与物种多度分布的影响[J].西北植物学报, 2024,44(1):142-153.
- [7] 田景,张美玲,王晨,等.基于DAYCENT模型的甘南高 寒草甸土壤有机碳含量动态模拟及影响因素的灰色关联 度分析[J].环境科学学报,2024,44(6):384-394.
- [8] 陈思宇,于惠,冯琦胜,等.甘南高原土壤氮磷比空间异质 性研究[J]. 草地学报,2013,21(1):30-36.
- [9] 于瑞新.甘南季节性牧场不同坡向土壤碳氮磷含量分布 特征[D].兰州:西北师范大学,2023.
- [10] 李长生. 生物地球化学的概念与方法——DNDC模型 的发展[J]. 第四纪研究, 2001(2):89-99.
- [11] Li C S. The DNDC Model. Evaluation of Soil Organic Matter Models[J]. Springer, 1996, 38:263-267.
- [12] Li H, Wang L G, Li J Z, et al. The development of China-DNDC and review of its applications for sustaining Chinese agriculture [J]. Ecological Modelling, 2017, 348:1-13.
- [13] 刘放,吴明辉,杨梅学,等.DNDC模型的研究进展及其 在高寒生态系统的应用展望[J].冰川冻土,2020,42
 (4):1321-1333.
- [14] 谢海宽,江雨倩,李虎,等.DNDC模型在中国的改进及 其应用进展[J].应用生态学报,2017,28(8):2760-2770.
- [15] 成思潮,李广,姚瑶,等.DNDC模型模拟不同施肥水平 下旱作麦田土壤N₂O排放及敏感性分析[J].甘肃农业 大学学报,2023,1-15.

- [16] 张世航,岳平,陈玉森,等.反硝化一分解模型在荒漠土 壤CH₄和N₂O通量估计中的应用[J].中国沙漠,2023, 43(3):220-229.
- [17] Li R H, Li X B, Li G Q, et al. Simulation of soil nitrogen storage of the typical steppe with the DNDC model: A case study in Inner Mongolia, China[J]. Ecological Indicators, 2014, 41:155-164.
- [18] Wu G L, Liu Y F, Wang D, et al. Divergent successions to shrubs— and forbs—dominated meadows decrease ecosystem multifunctionality of hillside alpine meadow [J]. Catena, 2024, 236:107718.
- [19] 宋永鹏,唐希颖,贾亚敏,等.甘南地区二氧化碳施肥效
 应对生态系统的影响[J].生态学报,2021,41(18):
 7301-7311.
- [20] 高峰,律可心,乔智,等.青藏高原东缘生态过渡带碳中 和评估与预测[J].生态学报,2022,42(23):9442-9455.
- [21] 章志龙,施蕾蕾,高君智,等.甘南草原生态治理的实践 与探索[J].环境保护,2023,51(20):36-40.
- [22] 张春花.甘南州草地资源现状及发展对策[J].甘肃高师学报,2004,9(5):56-57.
- [23] 马玉秀.甘肃省甘南州高寒地区人工饲草地建植与利用[J].畜牧兽医科学(电子版),2019(11):159-160.
- [24] Yin S, Zhang X X, Lyu J Y, et al. Carbon sequestration and emissions mitigation in paddy fields based on the DNDC model: A review[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2020, (4):140-149.
- [25] 王德娟,汪健平,冯建中,等.基于DNDC模型的红枣生 长模拟参数敏感性和产量不确定性分析[J].新疆农业 科学,2023,60(3):651-663.
- [26] 韩东亮,贾宏涛,朱新萍,等.DNDC模型预测新疆灰漠
 土农田有机碳的动态变化[J].资源科学,2014,36(3):
 577-583.
- [27] 贾晓楠,张美玲,朱美婷,等.基于CENTURY模型的甘 南高寒草甸土壤氮动态模拟研究[J].草原与草坪, 2023,43(3):28-38.
- [28] 张瑶瑶.甘南州草地土壤有机碳、全氮空间分布特征及 影响因素分析[D].兰州:兰州大学,2019.
- [29] 李长生.陆地生态系统的模型模拟[J].复杂系统与复 杂性科学,2004,1(1):49-57.
- [30] 姚文杰.甘南牧区草地生态补偿绩效评价[D].兰州:兰 州大学,2017.
- [31] 李强,宋彦涛,周道玮,等.围封和放牧对退化盐碱草地

土壤碳、氮、磷储量的影响[J]. 草业科学,2014,31(10): 1811-1819.

- [32] 白云晓,李晓兵,王宏,等.草地退化过程中典型草原氮
 储量的变化——以内蒙古锡林浩特市典型草原为例
 [J].草业科学,2015,32(3):311-321.
- [33] 林伟山,德科加,钱诗祎,等.高寒草甸植被一土壤养分 含量与气象因子相关关系研究[J].草原与草坪,2023, 43(6):109-120.
- [34] 李启权,岳天祥,范泽孟,等.中国表层土壤全氮的空间 模拟分析[J].地理研究,2010,29(11):1981-1992.
- [35] 任建新,唐亮,何明珠,等.陇西县土壤氮储量的空间分布特征及其影响因素研究[J].水土保持学报,2020,34
 (6):318-324.
- [36] 魏巍,周娟娟,刘云飞,等.草地利用方式对藏嵩草沼泽 化高寒草甸植被和土壤特征的影响[J].草原与草坪, 2022,42(4):55-61.
- [37] 朱航勇,汪久连,赵志明,等.梅州市林地土壤氮储量及 空间分布特征[J].林业与环境科学,2022,38(4): 7-12.
- [38] 杨天成,海春兴,李晓佳,等.内蒙古典型草原区土壤理 化性质对不同利用方式的响应[J].草原与草坪,2022,

42(4):139-146.

- [39] 罗帅伟.青藏高原高寒草地土壤碳-氮-磷空间分布格 局研究[D].兰州:兰州大学,2023.
- [40] 王淑平,周广胜,吕育财,等.中国东北样带(NECT)土 壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系[J].植 物生态学报,2002(5):513-517.
- [41] 姚世庭,芦光新,周华坤,等.模拟增温对高寒草甸土壤 性质的影响[J].草地学报,2021,29(S1):218-224.
- [42] 史作民,刘世荣,程瑞梅.内蒙古鄂尔多斯地区四个植物
 群落类型的土壤碳氮特征[J].林业科学,2004,(2):
 21-27.
- [43] 舒敏,陈懂懂,李奇,等.三江源区高寒草地表层土壤碳、 氮、磷密度空间稳定性分析[J].草地学报,2023,31(9): 2748-2758.
- [44] 袁杰,曹广超,鄂崇毅,等.自然生长和人为影响下土壤
 碳氮含量差异及影响因素[J].水土保持研究,2023,30
 (3):163-187.
- [45] 闫钟清,齐玉春,董云社,等.草地生态系统氮循环关键 过程对全球变化及人类活动的响应与机制[J].草业学 报,2014,23(6):279-292.

Simulation of soil total nitrogen density in alpine meadow of Gannan based on DNDC model

ZHANG Rui-qi, ZHANG Mei-ling*, TIAN Jing, WANG Chen, LI Zhao

(College of Science, Gansu Agricultural University, Center for Quantitative Biology Research, Lanzhou, 730070, Gansu)

Abstract: [Objective] In this study, the soil total nitrogen density in alpine meadow in Gannan Prefecture was simulated from 1993-2022 based on the DNDC model with localized parameters. It aims to explore the variations and influencing factors of soil total nitrogen density over the past 30 years. [Method] The Kriging difference method was used to analyze the spatial dynamic distribution of soil total nitrogen density. One - way analysis of variance (ANOVA), correlation analysis, and principal component analysis were used to investigate correlation between soil total nitrogen density and different soil layers, as well as various environmental factors. [Result] The total soil nitrogen density in the alpine meadows of Gannan Prefecture fluctuated greatly over the past 30 years, exhibiting a fluctuating upward trend until 2005, reaching a maximum of 92 410. 05 kg/hm² in 2005, followed by a downward trend. In terms of spatial distribution, nitrogen density decreased from west to east. Among them, the highest total nitrogen density was observed in Maqu, followed by Xiahe and Luqu, with the lowest recorded value in Diebu and Zhouqu. The total nitrogen density of soil gradually decreased with the increase of soil depth. For the 0~10 cm soil layer, nitro-

gen density increased from 4 823. 14 kg/hm² to 5 093. 29 kg/hm², while the total nitrogen density of 10~20 cm and 20~30 cm soil layer decreased. Specifically, the total nitrogen density in the 10~20 cm soil layer decreased from 3 874. 14 kg/hm² to 3 699. 41 kg/hm², and the total nitrogen density of the 20~30 cm soil layer decreased from 2 845. 59 kg/hm² to 2 725. 41 kg/hm². One—way ANOVA and principal component analysis revealed that there were significant differences in soil total nitrogen density across different soil layers. The analysis also showed a significant relationship between nitrogen density and annual mean temperature, with higher temperatures associated with lower total nitrogen density within the soil. Additionally, soil nitrogen density was inversely correlated with annual mean precipitation. Correlation analysis indicated that there was a significant positive correlation between total nitrogen density decreasing with increasing soil depth. Altitude, organic carbon content, and clay proportion were positively correlated with total nitrogen density, while soil bulk density, pH and soil water content were negatively correlated. This study offers valuable insights into the dynamic changes insoil total nitrogen density and provides a scientific basis for grassland management and grazing in the Gannan area, contributing to the protection of ecosystems.

Key words: total soil nitrogen density; alpine meadows; DNDC model; spatiotemporal distribution; Gannan

(责任编辑:康宇坤)