

干旱荒漠区土壤碳循环研究进展与展望

霍海霞¹, 张建国^{2*}, 马爱生³, 霍军文⁴

(1. 杨凌职业技术学院 水利工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 延安市水土保持监测分站, 陕西 延安 716000)

摘要:面积广阔的干旱荒漠区是一个非常重要的碳库,其碳循环也是影响大气 CO₂ 浓度和全球变化的关键生态学过程。了解目前干旱荒漠区土壤碳循环研究现状对于准确评估全球碳收支具有重要意义。为给荒漠化防治和荒漠区水土资源的合理开发利用提供参考,本研究在对国内外干旱荒漠区土壤碳的分布、土壤碳通量过程、影响因素等方面的研究现状进行系统总结的基础上,指出当前仍存在诸如荒漠土壤固碳机理、碳转移和归宿、多尺度荒漠生态系统碳循环以及荒漠生态系统对气候变化的响应过程与机理等方面的不足,需要对这些科学问题做进一步的深入研究。同时,非常有必要建立全国性的荒漠生态系统碳通量观测网络,并加强荒漠土壤碳的可持续管理。

关键词: 干旱荒漠; 土壤碳; 碳循环; 碳淋溶; 研究进展

中图分类号:S714.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2018)01-0098-07

Progress and Prospects of Soil Carbon Cycle in Arid Deserts

HOU Hai-xia¹, ZHANG Jian-guo^{2*}, MA Ai-sheng³, HUO Jun-wen⁴

(1. College of Hydraulic Engineering, Yangling Vocational & Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

4. Yan'an Soil and Water Conversation Monitoring Sub-Station, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: Large area of arid deserts is an important carbon pool, and the carbon cycle in these areas is also a key ecological process impacting atmospheric CO₂ concentration and global change. Understanding current research status of soil carbon cycle has important significance for accurately estimating global carbon budget. To provide references for desertification control and rational utility of regional soil and water resources, research status of soil carbon distribution, soil carbon flux process and influencing factors in arid desert regions were systematically reviewed. It was demonstrated that current studies are not sufficient on soil carbon sequestration mechanisms, carbon transfer and destination, multi-scale carbon cycle in desert ecosystem, response processes and mechanisms of desert ecosystem to climate change, and etc. Thus, these issues need further study. Meanwhile, it is very necessary to establish a national monitoring network of carbon fluxes for desert ecosystems, and to strengthen the sustainable management of soil carbon in deserts.

Key words: arid desert; soil carbon; carbon cycle; carbon leaching; progress

随着大气 CO₂ 浓度以及全球温度的不断升高,位于陆地表层的土壤碳循环成为近些年全球变化研

究的焦点。干旱荒漠区植被匮乏,土壤有机碳 (SOC) 含量非常低,30 多年前, W. H. Schlesinger^[1]

收稿日期:2017-03-26 修回日期:2017-04-18

基金项目:国家自然科学基金项目“塔里木沙漠公路防护林土壤盐结皮的生态环境效应与作用机制”(41471222);中国科学院水土保持研究所青年人才专项“毛乌素沙地人工植被的土壤环境效应及作用机制”。

作者简介:霍海霞,女,讲师,研究方向:水土保持。E-mail:hxhuohuo@tom.com

* 通信作者:张建国,男,博士,副教授,研究方向:荒漠化防治。E-mail:zhangjianguo21@nwafu.edu.cn

研究认为土壤无机碳(SIC)库基本是一个“死库”,对现代碳循环的贡献几乎可以忽略不计,因此在全球碳循环研究中,干旱荒漠区长期被忽视。但最新的研究结果表明,干旱荒漠以缓慢的速率大量吸收空气中的CO₂,其碳循环过程是陆地生态系统碳循环的重要环节,况且全球荒漠面积约占陆地总面积的1/4,因此在延缓全球气候变化方面的重要作用是不可忽略的^[2-3]。长期以来,针对全球碳循环研究的热点问题,国内外众多学者对干旱区荒漠生态系统的碳循环过程进行了较为系统的研究,并取得了很多重要的研究成果。本研究旨在对已有成果进行系统总结,以促进干旱荒漠区碳循环研究的进一步深入开展,揭示干旱荒漠区土壤固碳过程及机理,探寻“汇”的碳,丰富土壤学基础理论,为荒漠化防治和区域水土资源的合理开发利用提供参考。

1 土壤碳分布及影响因素

1.1 土壤碳的分布

相当长一段时间内,众多学者主要关注的是土壤有机碳(SOC),而对于土壤无机碳(SIC)的研究相对较少。干旱荒漠有限的生产力和较低的土壤含水量以及特殊的土壤理化性质(如较高的土壤pH值),使得土壤碳储量表现为SOC储量相对贫乏,而SIC储量比较丰富^[4]。SIC库是干旱、半干旱区土壤碳库的主要形式,一般比土壤SOC库大2~5倍^[5],而贡璐^[6]等对塔里木盆地南缘典型绿洲SOC和SIC的研究结果表明,SOC含量(2.51 g·kg⁻¹)远低于SIC(25.63 g·kg⁻¹),仅为SIC含量的10%左右。全球约有40%的干旱土地,而我国西北干旱区SIC储量相当于全球的1/20~1/15^[7]。

Y. Li^[8]等和J. Liu^[9]等的研究显示,干旱荒漠区是一个巨大的无机碳汇,发挥着极其重要的固碳作用,由此激发了众多学者对SIC特别是干旱半干旱区SIC的关注。SIC包括土壤溶液中HCO₃⁻、土壤空气中CO₂及土壤中淀积的CaCO₃,其中以CaCO₃占绝对优势,多以结核状、菌丝状存在于土壤剖面。作为判断土壤形成、发生与分类的重要指标之一,CaCO₃在土壤剖面中的淋溶和淀积特征与土壤发生分类研究关系密切。A. M. Cunliffe^[10]等的研究表明,旱地钙质土壤中>2 mm的稳定性团聚体包含了很高比例(24%~34%)的浅层土壤总有机碳(TOC),CaCO₃沉积可以促使土壤固定更多的有机碳。

1.2 土壤碳分布的影响因素

荒漠土壤碳的分布受多重因素的影响。据估算,面积为310.37×10⁴ km²中亚荒漠总生物碳储

量为57.03×10⁷ t,在未来降雨持续增加的条件下其将会有更大的碳汇潜力^[11]。在毛乌素流动沙地上进行植被建设有助于土壤固碳,不同植被类型间的固碳效果差异性非常明显,但应尽量减少和避免强烈的人为干扰,以维持土壤碳库稳定^[12]。青海共和高寒沙地乌柳防护林生态系统具有“碳汇”功能,碳储量随林龄的增加而显著增加^[13]。科尔沁沙地南缘小叶锦鸡儿和黄柳灌丛群落碳密度随林龄增加而增加,具有一定的碳汇潜力,林龄<10 a时为年碳汇速率增长迅速期,随着林龄的增加,年碳汇速率有下降的趋势^[14]。内蒙荒漠草原SOC与SIC含量呈明显的负相关关系,SOC含量随土壤深度增加逐渐降低而SIC含量依次增加,且存在明显的SOC向SIC转化^[15-16]。徐薇薇^[17]等研究结果表明,SOC含量与土壤营养成分和交换性阳离子含量呈显著正相关,与土壤pH和容重呈显著负相关,同时也证明了SOC和SIC含量呈显著负相关。刘丽娟^[18]等对民勤绿洲0~10 cm土壤可溶性无机碳(DIC)空间分布特征进行了研究,结果表明该区DIC平均含量为0.056 g·kg⁻¹,从南向北整体呈逐渐降低的趋势,其中耕地和沙地含量较高,而林地、草地和盐碱地则较低。DIC含量与HCO₃⁻呈极显著正相关,与其他土壤离子呈显著负相关,而与pH呈弱的正相关。

截至目前,干旱荒漠区土壤碳分布的有关研究多集中在SOC方面,而SIC方面的研究相对不足,特别是对于碳酸盐的空间分布及区域碳储量的研究报道更为少见,但这部分碳在大气、植被、土壤碳库间的长期动态变化中发挥着重要作用。碳酸盐形态的SIC(约940 PgC)和地下水中的碳酸氢盐(约1404 PgC)组成了陆地最大的碳库,超过了土壤有机碳(类似于1530 PgC),其巨大规模的碳库得到了普遍认可,但对于无机碳固持大气CO₂潜力的争议仍未解决^[19]。

2 土壤碳循环过程

2.1 土壤碳通量过程

众多研究表明,干旱荒漠以缓慢的速率大量吸收空气中的CO₂^[2-3,8-9],在延缓全球气候变化方面发挥着重要作用。这些被吸收的CO₂最终的归宿是地下咸水层,因而存在一个巨大的活动无机碳库^[8]。国内外学者对撒哈拉沙漠、腾格里沙漠、阿拉善沙漠、塔克拉玛干沙漠等荒漠地区的CO₂通量进行了较为系统的研究。T. Tagesson^[20]等的研究表明,撒哈拉沙漠是一个面积巨大的碳汇,土壤水分和植被是影响CO₂吸收和释放的关键因素。高艳红^[21]等的研究表明腾格里荒漠红砂-珍珠群落在6:00—

9:00 出现 1 个 CO_2 吸收的高峰值, 随后在 12:00—15:00 出现 1 个 CO_2 释放高峰值。T. Shao^[22] 等的研究表明, 阿拉善沙漠 1~5 m 沙层的 CO_2 浓度高于大气, 说明该沙漠暖季是一个向大气释放碳的源; 不同沙层的 CO_2 浓度日变化呈先升高后减低的趋势, 温度和含水量是引起浓度变化的主要因素。塔克拉玛干沙漠腹地 CO_2 通量表现为白昼地表吸收 CO_2 , 夜间地表排放 CO_2 , 且地表吸收强度明显>地表排放, 春夏季节平均净吸收速率分别为 $147.31 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $129.89 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[23], 冬季平均净吸收速率是 $1.45 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[24]。

2.2 土壤呼吸过程及其影响因素

土壤呼吸是温度与其他多种因子共同作用的结果, 温度的改变会影响土壤微生物和酶的活性, 同时也会改变非生物学碳循环过程^[25]。当距地表 10 cm 气温达到 30℃ 时, 土壤呼吸受到抑制; 土壤碳通量与土壤含水量之间呈显著的正相关关系^[26]。在塔克拉玛干沙漠腹地, CO_2 通量受大气稳定性影响较大, 稳定大气条件利于沙漠地表 CO_2 的释放, 不稳定大气条件有利于沙漠地表 CO_2 的吸收, 此外, 地表温度、土壤湿度、风速均与 CO_2 通量呈不同程度的负相关关系^[24]。其中, 地表温度对土壤呼吸贡献最大, 其次是 5 cm 土壤湿度^[24]。

土壤水分不仅是影响荒漠植物生长发育关键限制因子, 同时也是影响土壤碳排放的主要因子之一, 无论是降雨还是灌溉均会对土壤碳循环过程产生显著影响。在一定范围内, 土壤水分的增加将促进土壤呼吸作用^[27]。R. A. Sponseller^[28] 的研究表明, 降雨会使墨西哥索诺兰(Sonoran)沙漠的土壤呼吸迅速增加 30 倍, 刘殿君^[29] 等的研究也表明极端干旱区增雨会显著加剧泡泡刺群落的土壤碳排放, J. D. Jabro^[30] 等发现适度的灌溉可以加速土壤呼吸作用。土壤湿度是限制固定沙地植物群落土壤呼吸的重要因子, 随土壤湿度的增加而增加, 而沙化严重的流动沙地植物群落的土壤呼吸速率仅随土壤湿度的增加而有轻微增加。但 K. Y. Fa^[31] 等的研究表明, 降雨脉冲可以强烈影响毛乌素沙漠生态系统中的碳通量, 可以导致土壤吸收大气的 CO_2 , 这可能是由于降雨改变了土壤与大气间的气压差所致。当土壤水分>一定阈值时, 土壤水分的增加反而会降低土壤呼吸速率, 因为高含水量导致土壤通透性变差, 土壤缺氧会引起根系呼吸作用减弱, 并使 CO_2 在土壤中的扩散阻力增大^[32]。降水模式确定了以禾本科植物为主的沙漠生态系统碳通量的年际变化^[33]。张前前^[34] 等研究了微咸水灌溉条件下新疆干旱区绿

洲棉田土壤 CO_2 通量, 结果表明微咸水灌溉可显著降低土壤 CO_2 通量, 降低土壤有机质的矿化分解速率, 从而有利于增加土壤碳的固定量。土地利用方式也会对荒漠草地碳密度产生重要影响^[35]。

电导率是影响盐生土壤呼吸的主要因素。颗粒状有机碳、腐殖质 C 和黏土的含量也会产生影响, 但它们的影响程度主要取决于盐的影响^[36]。pH 的升高也会加速沙质土壤中的“天然”有机碳的矿化^[37]。此外, 生物结皮在碳固持方面也发挥着重要作用。藻类和苔藓是荒漠地表普遍存在的固碳生物(蓝藻、绿藻和苔藓等), 不仅能够改善土壤的物理性质, 起到保护土壤的作用, 最重要的是这些固碳生物能够通过光合作用固定空气中的 CO_2 , 是荒漠地区土壤表层固碳的主要贡献者^[38]。内盖夫沙漠有生物结皮覆盖区和无生物结皮覆盖区整体碳固定量分别为每年 $3.7 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $2.3 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[39]。根据 V. R. Squires^[40] 的预测, 未来的 50 a 干旱、半干旱地区每年能固定碳 $1.0 \times 10^{15} \text{ g}$ 。

干旱半干旱区土壤吸收 CO_2 的机制包括大气压输送、碳酸盐溶解和土壤水包气带渗滤作用^[41], 但 W. H. Schlesinger^[42] 认为每个机制都不足以解释涡流-协方差系统的观测, 因此对沙漠生态系统无机碳吸收的准确性提出了质疑。面积广袤的干旱荒漠区是一个潜在的巨大碳汇, 其极低的土壤有机碳含量使之具有巨大的增碳潜力, 该区域水土资源的合理开发利用与管理对于生态环境和全球气候变化的重要性不言而喻, 开展土壤碳相关的研究具有十分重要的战略意义和理论价值。

2.3 土壤碳淋溶过程

众所周知, 水是影响干旱荒漠区生态系统稳定性最关键的因素。同时, 灌溉也是影响土壤碳储量的重要因素, 因为灌溉可以使土壤可溶性碳发生淋溶。土壤碳的淋溶流失是指在水的作用下土壤中的碳沿着水文路径转移到水环境的过程。J. A. Entry^[43] 等对美国爱达荷州的研究表明, 灌溉会显著提高干旱区农田 SIC 固持量, 但同时也会造成可溶性碳淋溶损失。碳酸盐溶解是荒漠土壤通过无机过程吸收大气 CO_2 的主要方式^[44], 吸收的 CO_2 大部分被土壤液相捕获, 这部分碳可能会被淋溶至地下水^[8](图 1), 干旱荒漠盐碱土灌溉洗盐的过程中^[45-46] 同时会淋洗掉一部分土壤中的可溶性碳, 使之进入沙漠下的地下咸水层而形成碳汇^[8]。鉴于沙漠地下咸水层被厚厚的黄沙覆盖, 进入之后可能不再溢出, 因此可以说该碳汇几乎是一个单向发生过程: 一旦进入就成为了地质结构中的一部分^[47]。

土壤可溶性无机碳(SDIC)含量受降水和灌溉

的影响较大,当土壤含水量超过田间持水量时,SDIC浓度增加;另外,土壤pH值对SDIC含量也具有较大影响^[48]。研究表明,从土壤溶解淋溶出来的可溶性碳数量能够在很大程度上解释大气与陆地生态系统碳吸收数量的差异^[49]。干旱、半干旱区由于其特殊的地理位置及气候条件,使得土壤盐渍化程度较高,其次生碳酸盐就有显著的碳汇效应,作为动态性碳的SDIC,由于受自然降水和人工灌溉的作用,显著参与碳循环过程^[50]。干旱区荒漠绿洲灌溉农田有机碳和无机碳淋溶量十分可观,土壤的含盐量及作物灌溉量对土壤无机碳淋溶有重要影响^[51],

并且土地开发和作物的种植灌溉模式对土壤碳淋溶也具有显著影响^[52]。王艳丹^[53]等采用原状土柱模拟试验研究了强降雨对森林、不同植茶年限茶园SOC淋溶规律及淋溶通量,结果表明0~20 cm土层的SOC淋失通量大于0~40 cm土层,即0~20 cm土层流失的碳22.3%被20~40 cm土层截留,但仍然有占0~20 cm土层淋溶损失量77.7%的SOC通过40 cm厚的土层继续向下层淋溶,通过延长植茶年限可以减少SOC的淋溶损失而有利于土壤碳的储存。

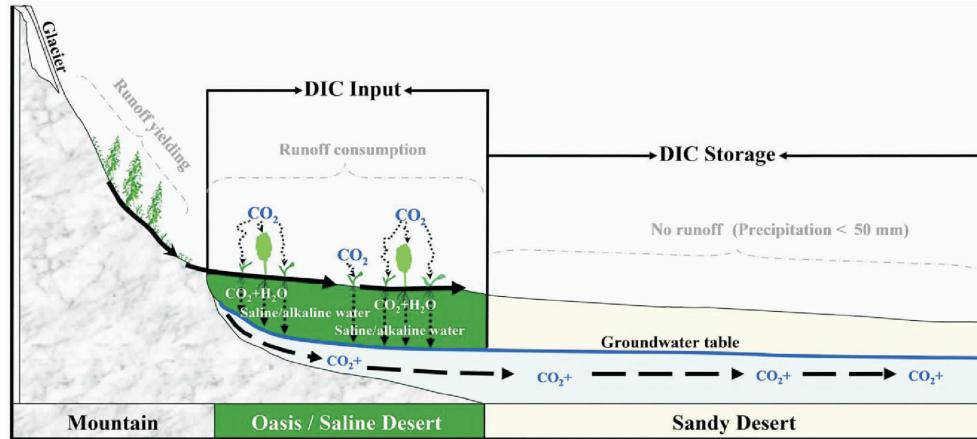


图1 塔里木盆地 DIC 淋溶与迁移示意

Fig. 1 Schematic diagram of DIC eluviation and immigration

2.4 荒漠化与荒漠化逆转对碳释放/固持的影响

荒漠化和荒漠化逆转在土壤碳固存方面发挥着截然相反的作用。土地荒漠化的加剧会显著降低土壤碳,特别是SOC储量^[54]。随荒漠化程度的加重,毛乌素沙地生态系统碳固持能力逐渐降低,采取合理措施使荒漠化土地向以油蒿或本氏针茅为主的固定沙地演替,有助于毛乌素沙地生态系统碳固持能力的提高和植物群落的生长^[55]。而干旱荒漠、次生盐渍化土地的植被恢复和重建具有很大的增加碳固存和改善土壤质量的潜力^[56-58],严重沙漠化土地的人工植被恢复会显著增加SOC和SIC的含量^[57]。X. Zhao^[59]等通过¹⁴C同位素标定技术室内模拟研究了新疆盐碱土CaCO₃重结晶固定CO₂过程,结果表明盐土可以比碱土固持更多的CO₂,且大气CO₂浓度是影响固持过程的最为关键的因素。荒漠化土地截留碳的潜力巨大,荒漠化防治导致的沙漠化逆转不仅能改善生态环境,促进区域社会经济的良性循环,而且土壤碳的固定对缓解CO₂排放和全球气候变化同样具有重要意义。

3 小结与展望

土壤无机碳库已被广泛认可。土壤碳的积累与否取决于碳输入与碳释放之间的平衡,土壤碳循环过程受到自然和人为因素的综合影响,存在非常大的变数。与农田、森林、草地等生态系统相比,目前对于干旱荒漠区土壤碳循环的研究仍存在非常大的差距,这方面的研究有待于进一步加强。荒漠区土壤碳循环现有的研究主要集中于碳储量和垂直分布特征方面,碳淋溶研究的报道非常少且以室内模拟为主,而关于荒漠土壤碳固定过程和机理的研究显得非常不足,仍存在很多的科学问题需要进一步探讨。

在全球碳循环的“未知汇”的寻找和相关研究中,陆地生态系统碳,特别是荒漠碳源/汇强度的估算方面仍存在很大的差异。因此,非常有必要建立全国性的荒漠生态系统碳通量观测网络,覆盖我国各类典型荒漠生态系统,以保证资料的可比性和延续性,用以全国层面的荒漠碳收支与计算,这对于国际碳谈判同样具有重要战略意义。而且土壤碳的形态与转移过程和速率的关系,以及碳转移过程的定量估计,也需要通过系统的野外定位观测和试验分析来推动。

干旱荒漠区气候干旱,大气蒸发潜力大,降雨非常稀少,光照强度大,恶劣的自然环境条件使得荒漠

纵观国内外相关研究,干旱荒漠区作为巨大的

生态系统极为脆弱。因此,为加强土壤碳的可持续管理,需要进一步加强自然因素和人为因素影响下的多尺度荒漠生态系统碳循环过程与机理的研究,特别强调对荒漠生态系统不同发展阶段(荒漠化与荒漠化逆转过程)、不同利用方式(荒漠转化为农田、人工林或草地等),荒漠生态系统对气候变化的响应过程与机理^[60],以及应对气候变化的荒漠生态系统管理对策和技术措施等的研究。比如,人工林在碳循环及温室气体减排中发挥着重要作用,通过科学合理的维护管理,增强荒漠人工林的土壤碳汇,对减缓大气温室气体浓度的提升具有积极的意义。

需要进一步加强荒漠生态系统土壤碳转移和归宿方面的研究。荒漠作为巨大的无机碳汇,降雨和灌溉过程中势必造成可溶性碳向深层土壤淋溶,Y. Li^[8]等的研究认为这部分碳主要被淋溶至地下水而被封存起来。但地表径流、灌溉和降雨对土壤碳的淋溶程度如何,在淋溶过程中碳存在形态的转化过程如何?特别是绝大部分荒漠区降雨量非常低,水资源短缺,且水质较差,利用劣质咸水灌溉是解决水资源短缺的重要途径^[61]。劣质咸水对土壤碳的固持和淋溶转化又会产生什么样的影响?另外,荒漠SOC在分解转化为SIC的过程和机理以及影响因素有哪些^[62],这些问题都需要研究来进一步揭示。

改进与拓展现有荒漠生态系统动态模型,发展具有自主知识产权的荒漠生态系统碳循环模型,强化遥感技术在草地生态系统碳平衡研究中的应用,以快速诊断与准确评估我国荒漠生态系统碳源/汇的时空分布格局。干旱荒漠区土壤碳“源/汇效应”及其驱动机制是当前土壤碳循环研究领域也是荒漠化防治领域的一个热点问题,目前对荒漠土壤碳库的研究主要集中于土壤有机碳的分布及其影响因素方面,而荒漠区土壤无机碳在最近几年才引起较为广泛的关注。因此,亟需加强对荒漠区土壤有机碳和无机碳动态及其驱动机制,特别是土壤无机碳固持及转化机理方面的研究,充分认识荒漠区土壤碳的“源汇”特征和机理。

开展上述研究,不仅对于荒漠生态系统的可持续性研究具有重要的实际应用价值,而且对于丰富全球碳循环过程的研究内容,丰富土壤学基础理论,促进区域水土资源的高效利用同样具有借鉴作用。

参考文献:

- [1] SCHLESINGER W H. The formation of caliche in soils of the Mojave desert, California[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(1): 57-66.
- [2] XIE J, LI Y, ZHAI C, et al. CO₂ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle[J]. *Environmental Geology*, 2009, 56: 953-961.
- [3] WANG W F, CHEN X, LUO G P, et al. Modeling the contribution of abiotic exchange to CO₂ flux in alkaline soils of arid areas[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(1): 27-36.
- [4] 杨黎芳,李贵桐,赵小蓉,等.栗钙土不同土地利用方式下有机碳和无机碳剖面分布特征[J].生态环境,2007,16(1):158-162.
- [5] YANG L F, LI G T, ZHAO X R, et al. Profile distribution of soil organic and inorganic carbon in chestnut soils of Inner Mongolia[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1): 158-162. (in Chinese)
- [6] ESWARAN H, REICH F, KIMBLE J M. Global soil carbon stocks[M]//LAL R, KIMBLE J, ESWARAN H, et al. *Global Climate Change and Pedogenic Carbonates*. USA: Lewis Publication, 2000: 15-26.
- [7] 贡璐,朱美玲,刘曾媛,等.塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性[J].环境科学,2016,37(4):1516-1522.
- [8] GONG L, ZHU M L, LIU Z Y, et al. Correlation among soil organic carbon, soil inorganic carbon and the environmental factors in a typical oasis in the southern edge of the Tarim Basin[J]. *Environmental Science*, 2016, 37 (4): 1516-1522. (in Chinese)
- [9] 潘根兴.中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J].科技通报,1999,15(5):330-332.
- [10] PAN G X. Study on carbon reservoir in soils of China[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5): 330-332. (in Chinese)
- [11] LI Y, WANG Y G, HOUGHTON R A, et al. Hidden carbon sink beneath desert[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42: 5880-5887.
- [12] LIU J, FA K, ZHANG Y, et al. Abiotic CO₂ uptake from the atmosphere by semiarid desert soil and its partitioning into soil phases[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42: 5779-5785.
- [13] CUNLIFFE A M, PUTTOCK A K, TURNBULL L, et al. Dryland, calcareous soils store (and lose) significant quantities of near-surface organic carbon[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2016, 121: 684-702.
- [14] 陶治,张元明.中亚干旱荒漠区植被碳储量估算[J].干旱区地理,2013,36(4):615-622.
- [15] TAO Y, ZHANG Y M. Evaluation of vegetation biomass carbon storage in deserts of Central Asia[J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(4): 615-622. (in Chinese)
- [16] 丁越肖,杨劼,宋炳煜,等.不同植被类型对毛乌素沙地土壤有机碳的影响[J].草业学报,2012,21(2):18-25.
- [17] DING Y Y, YANG J, SONG B Y, et al. Effect of different vegetation types on soil organic carbon in Mu Us desert[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(2): 18-25. (in Chinese)
- [18] 于洋,贾志清,朱雅娟,等.高寒沙地乌柳防护林碳库随林龄的变化[J].生态学报,2015,35(6):1752-1760.
- [19] YU Y, JIA Z Q, ZHU Y J, et al. Changes of carbon pools of alpine sandy *Salix cheilophila* shelterbelts with stand age [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (6): 1752-1760. (in Chinese)
- [20] 王娟,姚云峰,郭月峰,等.科尔沁沙地南缘小叶锦鸡儿和黄柳灌丛生态系统碳汇动态研究[J].生态环境学报,2015, 24

- (11):1785-1790.
- WANG J, YAO Y F, GUO Y F, et al. The carbon sink dynamic research on the *Caragana microphylla* and *Salix gordejevii* shrub ecosystem in the southern edge of Horqin Sandland[J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, 24(11):1785-1790. (in Chinese)
- [15] 张林,孙向阳,曹吉鑫,等.荒漠草原碳酸盐岩土壤有机碳向无机碳酸盐的转移[J].干旱区地理,2010,33(5):732-739.
- ZHANG L, SUN X Y, CAO J X, et al. Transfer of soil organic carbon to soil inorganic carbon in carbonate rock soil of desert grassland[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(5): 732-739. (in Chinese)
- [16] 张林,孙向阳,高程达,等.荒漠草原土壤次生碳酸盐形成和周转过程中固存CO₂的研究[J].土壤学报,2011,48(3):578-586.
- ZHANG L, SUN X Y, GAO C D, et al. CO₂ sequestration in formation and turnover of pedogenic carbonates in soil of desert steppe, inner Mongolia, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(3): 578-586. (in Chinese)
- [17] 徐薇薇,乔木.干旱区土壤有机碳含量与土壤理化性质相关分析[J].中国沙漠,2014,34(6):1558-1561.
- XU W W, QIAO M. Soil carbon contents in relation to soil physicochemical properties in arid regions of China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1558-1561. (in Chinese)
- [18] 刘丽娟,王玉刚,李小玉.干旱区绿洲土壤可溶性无机碳的空间分布特征[J].生态学杂志,2013,32(10):2539-2544.
- LIU L J, WANG Y G, LI X Y. Spatial distribution pattern of soil dissolved inorganic carbon in an arid oasis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(10): 2539-2544. (in Chinese)
- [19] MONGER H C, KRAMER R A, KHRESAT S, et al. Sequestration of inorganic carbon in soil and groundwater[J]. Geology, 2015, 43(5): 375-378.
- [20] TAGESSONA T, FENSHOLT R, CAPPELAERE B, et al. Spatiotemporal variability in carbon exchange fluxes across the Sahel[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 226-227:108-118.
- [21] 高艳红,李新荣,刘立超,等.腾格里荒漠红砂-珍珠群落CO₂收支变化及其不同观测方法间的比较[J].生态学报,2015,35(7):2085-2093.
- GAO Y H, LI X R, LIU L C, et al. Variation of the carbon budget and comparison between static chamber method and eddy covariance method in the *Reaumuria soongorica-Salsola passerina* community in the Tennger desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2085-2093. (in Chinese)
- [22] SHAO T, MA Y, ZHAO J, et al. Vertical distribution of sand layer CO₂ concentration and its diurnal variation rules in Alxa desert region, northwest China[S/J/OL]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(18): 1269 [2016-9-17]. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6083-6>.
- [23] 陈慧,缪启龙,买买提艾力·买买提依明,等.塔克拉玛干沙漠腹地春、夏季CO₂通量特征[J].干旱区地理,2015,38(3):487-493.
- CHEN H, MIAO Q L, ALI M, et al. CO₂ flux characteristics of Taklimakan desert in spring and summer[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(3): 487-493. (in Chinese)
- [24] 刘跃辉,艾力·买买提依明,杨帆,等.塔克拉玛干沙漠腹地冬季土壤呼吸及其驱动因子[J].生态学报,2015,35(20):6711-6719.
- LIU Y H, ALI M, YANG F, et al. Environmental factors driving winter soil respiration in the hinterland of the Taklimakan desert, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6711-6719. (in Chinese)
- [25] 王新源,李玉霖,赵学勇,等.干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J].生态学报,2012,32(15):4890-4901.
- WANG X Y, LI Y L, ZHAO X Y, et al. Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4890-4901. (in Chinese)
- [26] 黄湘,陈亚宁,李卫红,等.塔里木河中下游胡杨群落土壤碳通量日变化研究[J].自然科学进展,2006,16(11):1405-1410.
- [27] CONANT R T, DALLA-BETTA P, KLOPATEK C C, et al. Controls on soil respiration in semiarid soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36: 945-951.
- [28] SPONSELLER R A. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran desert ecosystem[J]. Global Change Biology, 2007, 13(2): 426-436.
- [29] 刘殿君,吴波,李永华,等.极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放[J].生态学报,2012,32(17):5396-5404.
- LIU D J, WU B, LI Y H, et al. Rain enrichment-accelerated carbon emissions from soil in a *Nitraria sphaerocarpa* community in hyperarid region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5396-5404. (in Chinese)
- [30] JABRO J D, SAINJU U, STEVENS W B, et al. Carbon dioxide flux as affected by tillage and irrigation in soil converted from perennial forages to annual crops[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88: 1478-1484.
- [31] FA K Y, LIU J B, ZHANG Y Q, et al. CO₂ absorption of sandy soil induced by rainfall pulses in a desert ecosystem[J]. Hydrological Processes, 2015, 29: 2043-2051.
- [32] DAVIDSON E A, VERCHOT L V, CATTANHO J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pasture of eastern Amazonia[J]. Biogeochemistry, 2000, 48: 53-69.
- [33] LIU R, CIERAAD E, LI Y, et al. Precipitation pattern determines the inter-annual variation of herbaceous layer and carbon fluxes in a phreatophyte-dominated desert ecosystem[J]. Ecosystems, 2016, 19: 601-614.
- [34] 张前前,王飞,刘涛,等.微咸水滴灌对土壤酶活性、CO₂通量及有机碳降解的影响[J].应用生态学报,2015,26(9):2743-2750.
- ZHANG Q Q, WANG F, LIU T, et al. Effects of brackish water irrigation on soil enzyme activity, soil CO₂ flux and organic matter decomposition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2743-2750. (in Chinese)
- [35] 刘文亭,卫智军,吕世杰,等.土地利用方式对荒漠草地生物量分配及碳密度的影响[J].中国沙漠,2016,36(3):666-673.
- LIU W T, WEI Z J, LYU S J, et al. Estimation of biomass stratosphere allocation and carbon density in different land-use types in *Stipa breviflora* desert grassland[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(3): 666-673. (in Chinese)
- [36] SETIA R, MARSCHNER P, BALDOCK J, et al. Relation-

- ships between carbon dioxide emission and soil properties in salt-affected landscapes [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43: 667-674.
- [37] LI X, RENGEL Z, MAPFUMO E, et al. Increase in pH stimulates mineralization of ‘native’ organic carbon and nitrogen in naturally salt-affected sandy soils [J]. *Plant and Soil*, 2007, 290: 269-282.
- [38] 李珂, 张洪勋. 荒漠地区土壤表层固碳作用研究进展 [J]. 科技导报, 2014, 32(19): 77-83.
- LI K, ZHANG H X. Research progress on carbon fixation in desert topsoils [J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(19): 77-83. (in Chinese)
- [39] KIDRON G J, LI X R, JIA R L, et al. Assessment of carbon gains from biocrusts inhabiting a dunefield in the Negev desert [J]. *Geoderma*, 2015, 253-254: 102-110.
- [40] SQUIRES V R. Dryland soils: their potential as a sink for carbon and as an agent in mitigating climate change [J]. *Advances in Geo-ecology*, 1998, 31: 209-216.
- [41] REY A. Mind the gap: non-biological processes contributing to soil CO₂ efflux [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21: 1752-1761.
- [42] SCHLESINGER W H. An evaluation of abiotic carbon sinks in deserts [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23: 25-27.
- [43] ENTRY J A, SOJKA R E, SHEWMAKER G E. Irrigation increases inorganic carbon in agricultural soils [J]. *Environmental Management*, 2004, 33(Supp. 1): 309-317.
- [44] FA K, LIU Z, ZHANG Y, et al. Abiotic carbonate dissolution traps carbon in a semiarid desert [J/OL]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23570 [2016-3-29]. <https://www.nature.com/articles/srep23570>.
- [45] 张建国, 徐新文, 雷加强, 等. 咸水滴灌淋洗土壤盐分的试验研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(5): 55-58.
- ZHANG J G, XU X W, LEI J Q, et al. Leaching effect of drip irrigation with saline water on soil salt [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(5): 55-58. (in Chinese)
- [46] ZHANG J G, XU X W, LEI J Q, et al. The effects of high salinity irrigation and shelterbelt age on the formation of soil salt crusts and soil evaporation in the Taklimakan desert highway shelterbelt of northwest China [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 13(4): 1019-1028.
- [47] 李彦, 王玉刚, 唐立松. 重新被“激活”的土壤无机碳研究 [J]. *土壤学报*, 2016, 53(4): 845-849.
- LI Y, WANG Y G, TANG L S. The effort to re-activate the inorganic carbon in soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(4): 845-849.
- [48] SIEMENS J. The European carbon budget: a gap [J]. *Science*, 2003, 302: 1681.
- [49] WALMSLEY D C, SIEMENS J, KINDLER R, et al. Dissolved carbon leaching from an Irish cropland soil is increased by reduced tillage and cover cropping [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142: 393-402.
- [50] KINDLER R, SIEMENS J, KAISER K, et al. Dissolved carbon leaching from soil is a crucial component of the net ecosystem carbon balance [J]. *Global Change Biology*, 2010, 17: 1167-1185.
- [51] 陆晴, 王玉刚, 李彦, 等. 干旱区不同土壤和作物灌溉量的无机碳淋溶特征实验研究 [J]. *干旱区地理*, 2013, 36(3): 450-456.
- LU Q, WANG Y G, LI Y, et al. A leaching experiment on inorganic carbon characteristics in the different soil salinity and irrigation in arid area [J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(3): 450-456. (in Chinese)
- [52] 解怀亮, 王玉刚, 李彦. 干旱区灌溉过程中碳淋溶试验研究 [J]. *干旱区研究*, 2015, 32(5): 903-909.
- XIE H L, WANG Y G, LI Y. Experimental study on carbon leaching during irrigation in arid areas [J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32(5): 903-909. (in Chinese)
- [53] 王艳丹, 杨常亮, 徐国富, 等. 不同植茶年限茶园的土壤有机碳淋溶特性 [J]. *安徽农业大学学报*, 2016, 43(2): 176-181.
- [54] ZHOU R L, LI Y Q, ZHAO H L, et al. Desertification effects on C and N content of sandy soils under grassland in Horqin, northern China [J]. *Geoderma*, 2008, 145: 370-375.
- [55] 丁金枝, 来利明, 赵学春, 等. 荒漠化对毛乌素沙地土壤呼吸及生态系统碳固持的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31(6): 1594-1603.
- DING J Z, LAI L M, ZHAO X C, et al. Effects of desertification on soil respiration and ecosystem carbon fixation in Mu Us sandy land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1594-1603. (in Chinese)
- [56] FENG Q, ENDO K N, CHENG G. Soil carbon in desertified land in relation to site characteristics [J]. *Geoderma*, 2002, 106(1): 21-43.
- [57] SU Y Z, WANG X F, YANG R, et al. Effects of sandy desertified land rehabilitation on soil carbon sequestration and aggregation in an arid region in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91: 2109-2116.
- [58] WANG Y, ZHAO C, MA Q, et al. Carbon benefits of wolfberry plantation on secondary saline land in Jingtai oasis, Gansu—a case study on application of the CBP model [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 157: 303-310.
- [59] ZHAO X, ZHAO C, WANG J, et al. CaCO₃ recrystallization in saline and alkaline soils [J]. *Geoderma*, 2016, 282: 1-8.
- [60] 周朝彬, 陈刘生, 牛攀新, 等. 干旱区降水格局改变的生态效应及其复杂性 [J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(3): 48-54.
- ZHOU C B, CHEN L S, NIU P X, et al. Ecological effects of the change of precipitation pattern and its complexity in arid regions [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(3): 48-54. (in Chinese)
- [61] ZHANG J, XU X, LI S, et al. Is the taklimakan desert highway shelterbelt sustainable to long-term drip irrigation with high saline groundwater [J/OL]. *Plos One*, 2016, 11(10): 0164106 [2016-10-6]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164106>.
- [62] 张林, 孙向阳, 曹吉鑫, 等. 西北干旱区森林和草原 SOC 向 SIC 转移的研究进展 [J]. *西北林学院学报*, 2010, 25(2): 40-44.
- ZHANG L, SUN X Y, CAO J X, et al. Research progress of soil organic carbon transfer to soil inorganic carbonates in forest and grassland soil in northwest arid areas [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2010, 25(2): 40-44. (in Chinese)