

重新被“激活”的土壤无机碳研究*

李彦[†] 王玉刚 唐立松

(中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要 荒漠区植被稀疏、土壤有机碳含量低, 在全球碳循环研究中, 一直被忽略。但 2006 年前后, 若干研究显示干旱荒漠区具有潜在的碳汇功能, 一直被认为是死碳的土壤无机碳开始受到关注, 长期被忽视的干旱荒漠区无机碳碳循环重新进入人们的视野。后续的研究显示, 土壤中的溶解性无机碳并非来自土壤本身的碳酸盐, 而是来自土壤空气或大气, 是现代碳循环的一个重要环节。土壤温度的变化改变了 CO₂ 在土壤溶液中的溶解度, 催生出一个日出夜进的“无机呼吸”过程。这个“无机呼吸”过程在广义干旱、盐碱土区普遍存在; 在土壤生物过程微弱的荒漠区, 可以主导地-气界面的碳交换。盐碱土改良过程中溶解性无机碳的淋洗, 更可以直接形成储存于地下咸水层的无机碳汇。总之, 在生命过程微弱的干旱荒漠区, 无机碳过程可以主导地-气界面碳交换与碳汇的形成: 尽管这里起关键作用的不是土壤碳酸盐, 而是土壤中的溶解性无机碳。

关键词 荒漠区; CO₂ 负通量; 溶解性无机碳; “无机呼吸”; 盐碱土

中图分类号 S153.6⁺¹ **文献标识码** A

科学发展史上有一种常见的现象: 某个研究领域会在沉寂多年后被重新关注, 甚至成为研究热点。这种重新被“激活”过程, 一般是因新的科学发现引出了“老问题”, 而最近几年土壤无机碳的研究就大致经历了这样一个过程。众所周知, 干旱、半干旱区的土壤中存在大量以碳酸钙为主的无机碳, 钙积层的存在也很广泛, 但 30 年前一项研究却以无可辩驳的事实表明^[1]: 受限于钙离子供给, 碳酸盐或钙积层的形成是一个十分缓慢的过程 (无机碳累积速率 < 1 g m⁻² a⁻¹), 这个无机碳库基本是一个“死库”, 对现代碳循环的贡献几乎可以忽略不计。随后, 尽管还有研究试图精确量化全球或区域尺度的土壤无机碳库, 但均无法将其与碳汇联系起来。然而, 随着研究手段与技术的发展, 最近几年在墨西哥、美国、中国荒漠区均实地观测到了很大的 CO₂ 负通量^[2-4] (向下进入荒漠生态系统或荒漠土壤, 量级在 C 100 g m⁻² a⁻¹)。因为荒漠区微弱的生命过程不可能解释如此大的碳通量,

土壤无机碳重新进入人们的视野, 并被作为潜在碳汇进行研究。但从负通量的发现到碳汇的确认, 探索、研究的历程却十分的艰难曲折。

1 荒漠区 CO₂ 负通量的真假之争

在最初的研究中, 墨西哥^[2]、美国^[3]荒漠区的 CO₂ 负通量均是在群落水平上以涡度相关技术观测到的, 而中国^[4]则是在盐生荒漠土壤上以箱式法直接测到了进入土壤的 CO₂ 通量, 且多发生在夜间。鉴于三项研究均显示荒漠区可能存在一个巨大碳汇, 其负通量量级在 C 100 g m⁻² a⁻¹, 干旱荒漠区碳汇功能受到了学界与公众的广泛关注^[5]。但与此同时, 基于 CO₂ 负通量的荒漠区碳汇推测也受到了强烈质疑^[6]: 因为三项研究均未圆满回答进入的 CO₂ 最终归于何处, 即荒漠区如果是碳汇, “汇”在何处。墨西哥荒漠的研究^[2]以灌木生长解释这个负通量, 美国荒漠的研究^[3]则推测是荒

* 国土资源公益性行业科研专项 (201511047) 资助 Supported by Special Funding for Public Welfare on Land Resources (No.201511047)

[†] 通讯作者 Corresponding author

作者简介: 李彦 (1963—), 男, 山东人, 博士, 研究员, 主要从事荒漠生态研究。E-mail: liyan@ms.xjb.ac.cn

收稿日期: 2016-03-08; 收到修改稿日期: 2016-04-21; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-04-28

漠地表生物结皮的碳累积：均倾向于成因为生物过程。当时中国的研究虽然未就这个负通量给出具体的解释，但实验数据表明，彻底灭菌后的盐碱土依然能够强烈吸收CO₂，该吸收过程为一个非生物过程，发生在所有的广义盐碱土区，因而潜在的碳汇巨大，值得进一步研究^[4]。然而，对以上解释或推测的质疑也同样理由充足^[6]：生物量或生物结皮的增量均是可以观测的，而墨西哥与美国荒漠的相关研究均未提供这样的证据^[2-3]；盐碱土自形成后一直自然存在，如果它以所报道的速度（C 62 ~ 622 g m⁻² a⁻¹）、以无机（非生物）方式积累碳^[4]，不可能不被观测到。而且，土壤中的碳酸盐已经被证实几乎为“死碳”，不可能以这样的速度积累^[1]。质疑者^[6]最后以委婉的语言提醒：如果不能解释荒漠区CO₂负通量最终归于何处，那么很可能通量本身有问题：测量错误或者干脆就是假通量。

为了确定这个CO₂负通量是否可靠，中国的团队对仪器与方法进行了进一步的验证。当以化学性质极其稳定的石英砂替代土壤作为空白对照，24小时内所测CO₂通量为零——证明仪器与测量本身没有问题^[7]。在石英砂添加去离子水后，24小时可测到极其微弱的波动。但在添加盐碱土的土壤溶液后，一个显著通量出现了：表现为日出夜进，24小时均值为零^[7]。进一步分析发现，这一通量是一个简单的无机过程造成的。盐碱土的土壤溶液CO₂溶解度很高：随pH指数上升、随电导率（EC）线性上升；因而在盐碱土溶液中有大量CO₂存在。而溶解度又与温度负相关：白天温度升高时溶解度减低，CO₂溢出；夜间温度下降时溶解度升高，CO₂被吸收。因而在盐碱土中，存在一个“无机呼吸”过程。在生物过程极其微弱的荒漠区土壤中，这个无机过程可以导致土壤表面CO₂负通量（主要在夜间）的产生^[7]。几乎同时，美国相关团队也确认了荒漠区土壤表面夜间CO₂负通量的存在，并确认此时土壤亚表层中CO₂分压低于大气，土壤从大气中直接吸收CO₂^[8]。

然而，这个日出夜进、但总体上平衡的“无机呼吸”过程并不能形成真正的碳汇。那么灭菌盐碱土表面巨大的、24小时持续的CO₂负通量^[4]从何而来？进一步的分析发现这一现象的确是一个测量错误。盐碱土灭菌是将土柱长时间置于高温蒸汽中完成：在此过程中，溶解于土壤溶液中的CO₂因

大于100℃的高温而几乎全部溢出。当土柱被重新置于野外，温度降低，CO₂从大气重新进入土壤溶液。但这个过程相当缓慢，需在温度平衡后的三至五天才能完成。因此，在温度平衡后、CO₂平衡前测到的CO₂负通量仅仅是灭菌过程中被强制溢出的CO₂的回归，它真的是一个“假的”CO₂负通量^[4, 9]。

至此，研究似乎又回归原点，除了能确认广义盐碱土中存在一个CO₂日出夜进的“无机呼吸”过程之外，整个过程与碳汇似乎没什么关系。但事实并非如此。

2 干旱区盐碱土改良过程是一个无机碳汇形成过程

其实，盐碱土“无机呼吸”存在的本身就给我们一个很重要的启示：如果因温度变化导致的溶解度变化可以制造出一个显著的CO₂日出夜进过程，那么溶解于土壤溶液中的CO₂（DIC）本身肯定数量可观。当这些DIC被向下淋洗离开土壤进入地下水，自然可以形成碳汇^[9]。换言之，绿洲区和荒漠边缘区土壤生物呼吸释放的CO₂，并不像其他地区那样返回大气，而是部分被土壤溶液吸收。这些CO₂在过量灌溉洗盐过程中，被淋洗进入地下水，并随着地下水运动水平输送而进入广饶的沙漠下（图1）。简而言之，这个碳汇过程是干旱区盐碱土改良、盐渍化控制的一个伴生过程：因为蒸发远大于降水，盐渍化是干旱区绿洲土壤的一个自然过程，而为了控制盐渍化，就必须洗盐。由于盐碱土溶液对CO₂的溶解度极高，洗盐必然也洗去溶解其中的CO₂。最终，这些CO₂随被洗的盐，经水平运移汇集在浩瀚沙漠下形成地下咸水层，形成了碳汇^[9]。图2给出的是从塔里木盆地南缘到中心地下潜水中DIC年龄的变化：从边缘到中心线性增加，边缘地下水中的DIC很年轻，为现代碳；而中心区DIC年龄则超过一万年。这表明DIC源于边缘绿洲区，缓慢输送至沙漠中心区（图2）。

这里出现了一个极易被质疑的问题：盐碱土中存在大量的碳酸盐，如何证明土壤溶液中DIC源于土壤呼吸或土壤中的空气，而不是溶解的碳酸盐？幸运的是，¹⁴C测年给出了答案（图3）。土壤与地下水中的DIC为现代碳，而土壤中碳酸盐的年龄高达一万年，二者不可能同源（图3）。更有甚者，

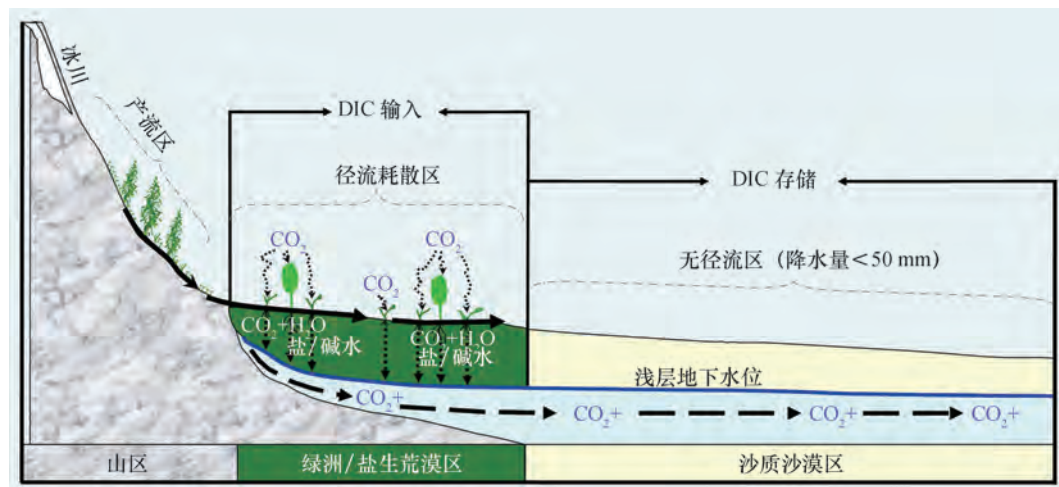


图1 干旱内陆盆地可溶性无机碳淋溶传输示意图——以塔里木盆地为例 (原图参见Li等^[9])

Fig. 1 Schematic diagram of DIC (dissolved inorganic carbon) leaching and transport in a closed arid basin: Tarim Basin as an example (reproduced from Li et al^[9])

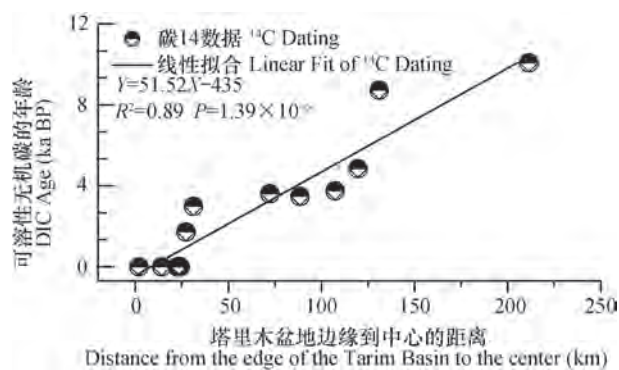
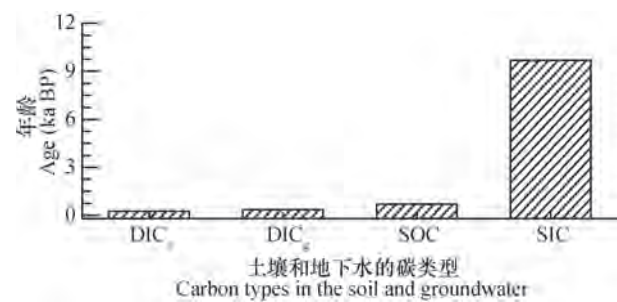


图2 塔里木盆地地下潜水中可溶性无机碳的年龄——以南缘为原点沿沙漠公路往北致沙漠中心点 (原图参见Li等^[9])

Fig.2 The age of DIC in the groundwater of Tarim Basin: From the southern edge to the center (reproduced from Li et al^[9])

DIC较土壤中的有机碳还年轻,说明DIC只能直接或间接(根系呼吸)地源于大气。因此,干旱区绿洲的洗盐过程形成了真正意义上的现代碳汇,而不是简单的无机碳迁移^[9]。初步估算,塔里木盆地因此形成的无机碳汇达每年2 Tg C,而地下咸水中DIC碳库则达20 Pg C。简单类推到陆地所有地下咸水层(假设所有地下咸水层单位面积汇流的强度与碳储量相同),全球因此形成总碳汇量约0.2 Pg C,地下咸水中总DIC储量上限可达1 000 Pg C。

该项研究^[9]发表后获得广泛关注,原因主要有三个方面:(1)在大家公认的最不可能地区——干旱荒漠区发现了碳汇,而且碳库很大;



注: DIC_s: 土壤可溶性无机碳; DIC_g: 地下水可溶性无机碳; SOC: 土壤有机碳; SIC: 土壤无机碳 Note: DIC_s: DIC in soil; DIC_g: DIC in the groundwater; SOC: Soil organic carbon; SIC: Soil inorganic carbon

图3 塔里木盆地边缘土壤、地下水中的可溶性无机碳(DIC)与土壤有机碳(SOC)、土壤碳酸盐(SIC)年龄对比 (原图参见Li等^[9])

Fig. 3 The age of DIC in soil, the groundwater, and the age of SOC, SIC in the soil at the edge of Tarim Basin (reproduced from Li et al^[9])

(2)干旱地区的内流河无入海口,而是最终消失于沙漠;从这个角度看,沙漠地下咸水就是内陆海的海洋,因而沙漠地下咸水可以形成一个类似于海洋的碳汇;(3)这个过程应该是自然存在的,即使没有灌溉,天然绿洲自身的维持也需要排盐:地表径流总会带来盐分,那么就必须向下淋洗与水平运移盐分,否则绿洲不能存在。当然,自然状态下(历史上)这一过程相当微弱,但却被人类活动大大的强化了。在干旱区盐碱地的开垦过程中,旨在

洗盐的过量灌溉强化了这个过程。换言之，干旱区人类开垦活动越强，对盐碱土改良投入的水资源越多，这个过程的程度就会越大。数据显示^[9]：在塔里木盆地，大约2 000年前，丝绸之路的开通显著提高了这个碳汇的强度。事实上，20世纪50年代、60年代的开垦活动最为剧烈，因而形成的碳汇强度也应该最大，但遗憾的是¹⁴C测年时间分辨能力有限，不能得到这一时间尺度上的碳汇变化规律。

3 认知、问题与启示

这项研究有意思的地方在于，CO₂负通量发现于干旱荒漠区^[2-4]，而最终确认的碳汇形成区却在绿洲土壤，储藏区在沙漠下的地下咸水^[9]：空间上、载体上均有错位。换言之，沙漠下无机碳汇的确认并未解决荒漠区CO₂负通量的问题。尽管后来的研究证明，在绿洲边缘潜水位很浅的、有植被覆盖的荒漠区，地下水位的波动可以在土壤中产生被动淋洗而形成碳汇^[10]，但这个结论并不适用于地下水位更深的广大沙漠区。最近的¹³C示踪研究显示，大气中CO₂可以直接进入沙漠土壤，并成为土壤颗粒中的一部分^[11]。但该项研究不能证实它是土壤中一个进出平衡的简单离子交换，还是真正的CO₂吸收。事实上，整个干旱区无机碳研究的核心难点在于：土壤、地下水均是开放系统，大气、土壤、植物、水之间的碳交换时刻在发生。要确定某个单方向的碳过程并确认其形成碳汇，考虑的时间尺度与空间尺度必须足够大，而最终的确认必须经得起物质平衡原理的检验。

尽管该方向的研究依然存在很多的不确定因素，但最近十年的进展还是显著的：

(1) 广义盐碱、荒漠区土壤中的确存在一个CO₂日出夜进“无机呼吸”过程。当该地土壤生物过程微弱时，“无机呼吸”可以主导土-气界面碳交换并在夜间形成“负呼吸”。在无植被、无结皮覆盖的塔克拉玛干沙漠腹地这种“无机呼吸”也存在，并且亦为CO₂进出平衡的过程^[9]。最新的研究还发现这个过程也发生在北极寒漠地区，并可主导当地的地-气界面碳交换^[12]，表明这个过程发生的范围更广，影响更深远。换言之，在广义干旱、盐碱土区，土壤-大气之间的碳交换有非生命过程的显著贡献，不能仅以传统土壤呼吸来定义或理解

该过程。

(2) 干旱区盐碱土改良中的洗盐过程同时洗去土壤中的可溶性无机碳，并进入沙漠下的地下水层而形成碳汇。鉴于沙漠下咸水层被厚厚的黄沙覆盖，进入之后可能不再溢出，该碳汇几乎是一个单向过程：一旦进入就成为了地质结构中的一部分。当然，随后的地球化学过程或地质过程仍需进一步探讨。

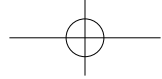
总之，迄今为止的研究并未真正“激活”土壤中的无机碳，但可以证明其中占比达20%的溶解性无机碳很活跃^[13]，是现代碳循环中的一个重要环节。进一步的研究不仅呼唤土壤生物过程、化学过程与地质、地球化学过程的交叉融合，更需要在大尺度、长周期上经得起物质平衡原理的检验。同时，该项研究的曲折历程也给我们一些有益的启示：

(1) 如果观测到看似不合理的数据，不要轻易否定或将其归结为测量误差：即使科学发展到今天，自然界中依然存在着很多我们没有充分认知的过程，尤其在极端环境中。

(2) 一时、一地观测或实验得到的结论，往往受制于当时、当地技术手段与环境条件。技术的发展与学科的交叉融合，往往会对已有明确结论的“老问题”产生新的认识：无论这些结论在当时、当地看起来是多么的无可辩驳。

参考文献

- [1] Schlesinger W H. The formation of caliche in soils of the Mojave Desert, California. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49 (1) : 57—66
- [2] Hastings S J, Oechel W C, Muhlia-Melo A. Diurnal, seasonal and annual variation in the net ecosystem CO₂ exchange of a desert shrub community (Sarcocaulis) in Baja California, Mexico. *Global Change Biology*, 2005, 11 (6) : 927—939
- [3] Wohlfahrt G L, Fenstermaker F, Arnone J A. Large annual net ecosystem CO₂ uptake of a Mojave Desert ecosystem. *Global Change Biology*, 2008, 14 (7) : 1475—1487
- [4] Xie J X, Li Y, Zhai C X, et al. CO₂ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle. *Environmental Geology*, 2009, 56 (5) : 953—961
- [5] Stone R. Have desert researchers discovered a hidden loop in the carbon cycle? *Science*, 2008, 320 (5882) : 1409—1410



- [6] Schlesinger W H, Belnap J, Marion G. On carbon sequestration in desert ecosystems. *Global Change Biology*, 2009, 15 (6) : 1488—1490
- [7] Ma J, Wang Z Y, Stevenson B A, et al. An inorganic CO₂ diffusion and dissolution process explains negative CO₂ fluxes in saline/alkaline soils. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2025
- [8] Hamerlynck E P, Scott R L, Sánchez-Cañete E P, et al. Nocturnal soil CO₂ uptake and its relationship to subsurface soil and ecosystem carbon fluxes in a Chihuahuan Desert shrubland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118 (4) : 1593—1603
- [9] Li Y, Wang Y G, Houghton R A, et al. Hidden carbon sink beneath desert. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42 (14) : 5880—5887
- [10] Ma J, Liu R, Tang L S, et al. A downward CO₂ flux seems to have nowhere to go. *Biogeosciences*, 2014, 11 (22) : 6251—6262
- [11] Liu J, Fa K, Zhang Y, et al. Abiotic CO₂ uptake from the atmosphere by semiarid desert soil and its partitioning into soil phases. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42 (14) : 5779—5785
- [12] Shanhu F L, Almond P C, Clough T J, et al. Abiotic processes dominate CO₂ fluxes in Antarctic soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 53: 99—111
- [13] Wang Y, Wang Z Y, Li Y. Storage/turnover rate of inorganic carbon and its dissolvable part in the profile of saline/alkaline soils. *PLoS ONE*, 2013, 8 (11) : e82029

The Effort to Re-Activate the Inorganic Carbon in Soil

LI Yan[†] WANG Yugang TANG Lisong

(*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*)

Abstract About ten years ago, the long-have-been neglected region in carbon cycle study, the desert region, started to get attentions, as several studies indicated that this was a huge potential carbon sink. The sparse vegetation and poor humus in desert soil made the inorganic carbon in desert soil the first candidate for seeking carbon sink. The following studies revealed that the dissolved inorganic carbon (DIC) is of atmospheric origin, and is an active participant in modern carbon cycle. Diurnal temperature variation changes the solubility of CO₂ in soil water, which in turn created an “inorganic respiration” in the soil with CO₂ pumped day-in/night-out. Extra irrigation, aimed at washing salt out of the soil in the largely saline/alkaline arid region, also washed the DIC out of the soil and forms a carbon sink in the groundwater. Studies thus far still can not prove that carbonates in the soil is an active player in modern carbon cycle, but can prove that in the desert soil with weak biotic processes, abiotic process may not only dominate CO₂ exchange between soil and atmosphere, but also create carbon sink of inorganic nature.

Key words Desert region; Downward CO₂ flux; Dissolved inorganic carbon; “Inorganic respiration”; Saline/alkaline soil

(责任编辑: 陈德明)