

DOI: 10.11766/trxb202209220524

龚子同, 黄成敏, 陈鸿昭, 张楚, 张甘霖. 土壤起源与宜居地球的形成[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 1–6.

GONG Zitong, Huang Chengmin, CHEN Hongzhao, ZHANG Chu, ZHANG Ganlin. Origination of the Earth Soil and Its Implications for the Establishment of the Earth Inhabitability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(1): 1–6.

土壤起源与宜居地球的形成*

龚子同¹, 黄成敏², 陈鸿昭¹, 张楚^{1, 3}, 张甘霖^{1, 3, 4†}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院流域地理学重点实验室(中国科学院南京地理与湖泊研究所), 南京 210008)

摘要: 在各种成土因素交互作用下, 地球土壤起源和演变历经变化的环境和多种成土过程。研究表明最早的古风化壳出现在太古宙; 而随着地球生物演进, 生物因素加入风化成土作用与成土过程, 土壤学家眼中的土壤形成、发育于寒武纪。漫长的地质历史时期不同的成土环境发育有各种类型土壤, 这些土壤发育与演化过程又反作用于景观、地形、生态系统、气候系统, 改变大气成分组成和地球化学循环, 影响、反馈、调节全球或地区的表层系统, 土壤圈的形成是宜居地球形成的重要标志。

关键词: 宜居地球; 地球土壤起源; 生命发生; 动植物演化; 成土过程; 土壤功能

中图分类号: S151 文献标志码: A

Origination of the Earth Soil and Its Implications for the Establishment of the Earth Inhabitability

GONG Zitong¹, Huang Chengmin², CHEN Hongzhao¹, ZHANG Chu^{1, 3}, ZHANG Ganlin^{1, 3, 4†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Construction and Environment, Sichuan University, Chengdu, 610000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Watershed Geographic Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Controlled by soil forming factors, the origination and development of earth soil had been experiencing contrasting environmental changes and corresponding processes. Previous studies have shown that the earliest weathering regolith appeared during the Archean Eon, with evolution of the Earth, biological forcing had been involved in soil formation and soils as defined by the modern concept got appeared during the Cambrian period. Over the geological periods soils formed and developed in episodic changing environments while the formation of soil and the establishment of soil cover (pedosphere) gave feedback to landscape evolution, topography, ecosystem and atmospheric system, therefore substantially changing atmospheric composition and altering global biogeochemical cycling. The formation of pedosphere is a prerequisite of the inhabitable earth.

Key words: Inhabitable earth; The origin of the earth soil; The origin of life; Evolution of animals and plants; Soil-forming process; Soil function

* 国家自然科学基金项目(42130715)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42130715)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: glzhang@issas.ac.cn

作者简介: 龚子同(1931—), 男, 研究员, 致力于土壤地理、土壤系统分类和土壤地球化学的研究。E-mail: ztgong@issas.ac.cn

收稿日期: 2022-09-22; 收到修改稿日期: 2021-10-24; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-10-29

土壤之于地球，犹如皮肤之于人体，土壤是地球生命系统中的重要组成部分，为人类的生存和可持续发展提供不可或缺的物质基础与生态服务。地球宜居性的形成涉及到大气组成、液态水等重要因子，还包括可以支持植被生长的土壤的形成。土壤连同其所支持的生态系统为地球宜居性提供了重要支持机制，这种支持机制主要体现在以下几个方面：（1）通过支持高等植物的生长为地球大气圈碳氧平衡提供交换器，从而维持大气成分相对稳定并适宜于地球生命；（2）在地球表层系统中发挥着核心功能，支持水和生命元素的生物地球化学循环，维系这些生命支持物质的循环和更新，滋养整个生态系统；（3）为高等生命提供所需的有机碳源和其他矿物质元素，直接维系高等生命的延续，比如人类。除此之外，土壤的风化和演化，还通过消耗和固存在平衡大气 CO_2 中发挥重要作用。因此，土壤圈是宜居地球的重要构成。作为反证，“皮之不存，毛将焉附”，如果地球表面没有这层被称为土壤的薄薄疏松表层，地球将同其他星球一样毫无生机^[1]。

从地球环境演化过程来看，土壤的形成具有必然性——风化和低等植物的生长必然导致原始土壤

形成和进一步演化，并最终形成覆盖全球陆地表层的土被（soil cover）。在地球演化的历史长河中，地球陆海变迁、冰室（icehouse）与热室（hothouse）气候转变、生物灭绝与爆发、大气成分及臭氧层变化等重大事件，直接影响土壤起源以及土壤圈形成与分布。同时，作为表层系统的重要组成部分^[2]，土壤的起源与发生、形成速率与发育强度变化也会直接或间接地对大气成分与碳氮地球化学循环、全球气候、景观形成与演化产生重要影响^[3]。总之，在宜居地球的演进过程中，土壤形成与发育是重要的地表驱动过程之一（图1）。

现代土壤发生学认为风化成土过程受物理、化学和生物作用影响，其中气候、地形、母质、生物和成土时间是控制土壤形成的五类自然因素^[4]。“将今论古”，漫长地球地质历史的不同时期风化成土因素与成土作用并非一成不变，完全与现代一致；某些成土作用或成土因素缺失背景下的风化产物是否为地球土壤起源或称为最古老的土壤尚存在不同观点。为此，本文以地球地质历史为时间轴，论述成土因素驱动下地质历史上土壤起源与发育、以及地球表层环境系统中土壤形成的响应特征。

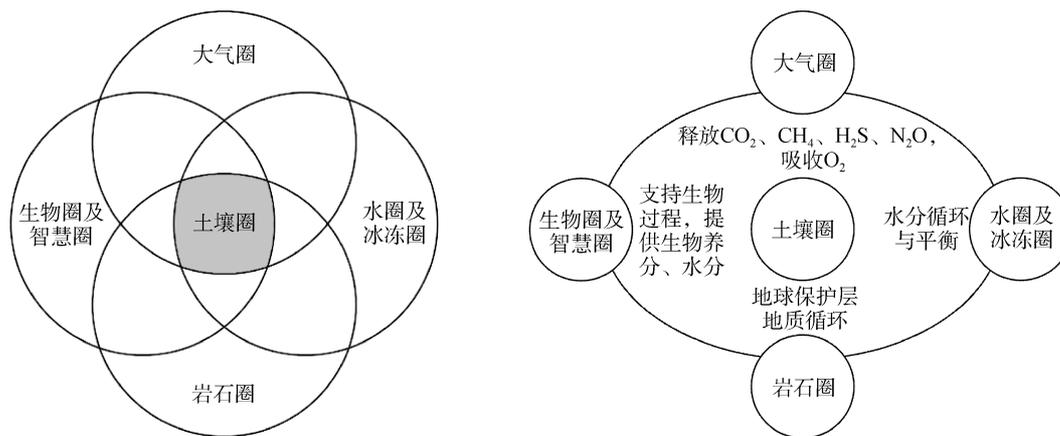


图1 土壤圈在地球表层系统和全球变化中的地位与作用^[2]

Fig. 1 The status and role of the pedosphere in the earth surface system and global change^[2]

1 前寒武纪风化壳

氧气和二氧化碳是影响地球环境与宜居性的两种关键气体。距今约23亿年前，地球大气中的氧气含量很低，只有约0.001%。而在距今23亿至20亿年，大气中的氧含量增长了若干个数量级，迅猛上升至现今水平的15%左右，即所谓的“大氧化事件

（Great oxidation event）”^[5]。该事件发生之后，地球的表生环境发生了剧烈变化，为真核生物的诞生、演化乃至动植物的生存提供了适宜环境^[6]。

Crowe等^[7]通过稳定同位素（C、S）、元素地球化学（Fe、Mo）等技术手段，对南非一些远古岩石地层进行了测试分析，发现了30亿年前大气中低浓度氧气的证据，这与Campbell和Allen^[8]等提出的

地球历史上大气游离氧有 7 次明显增加过程相一致。因而，大氧化说对早期生命形成过程随时间和空间的演化、土壤起源探索有推动作用^[9]。

尽管缺乏生物、尤其陆地高等植物因素及其生物风化作用，科学家还是在太古宙和元古宙地层中发现有古风化层存在。虽然不能绝对排除这些风化物质形成过程中生物因素参与的可能性，但因为生物活动或影响痕迹极微弱或难以发现，一些学者认为可称之为“古风化壳”，但不属于古土壤。地质学家认为经过强烈物理与化学风化作用的产物，剖面具有土壤结构、有黏粒等淀积、元素迁移等成土过程与特征，因此出现在地层中的这些风化层，应称为“古土壤”。这些“古土壤”可在相当程度上指示前寒武纪温度、降水量和早期大气圈化学成分（尤其是氧气）在内的古环境与古气候^[3]。

地质学家报道最老的“土壤”出现在约 37 亿年前^[10]。这类前寒武纪时期“古土壤”虽难识别，但通常具有一些特点：一般位于地层不整合面，且具有一定的土壤结构。同时，尽管此时大气氧含量低，但化学风化作用仍较强烈，既有水解作用，也有碳酸淋溶作用^[3]，可促使长石和绿泥石等矿物分解、Al/Ti 和 Si/Ti 比值下降以及元素 Al、Si 亏损。同时，岩石化学风化强度和特征以及“古土壤”发生特性极大地受古大气氧含量影响，特别是对氧化还原环境敏感的 Fe、V、Cr、Ce 等变价元素价态受当时大气中氧含量控制。当 Fe^{3+}/Fe^{2+} 增高、发现富 Fe^{3+} 黏土矿物出现，则指示大气氧含量有所增长；而鲜红色岩石（古风化壳）出现就是大气氧含量激增，例如大氧化事件的典型标志（图 2、图 3）^[7, 11]。



图 2 Crowe 等^[7]研究的一些岩石与 30 亿年前古风化壳
Fig. 2 3.0 Ga red rocks and paleo-weathering-crust studied by Crowe S A, et al^[7]



图 3 25 亿年前鲜红色岩石与“古土壤”（澳大利亚 Pilbara 地区）^[11]

Fig. 3 2.5 Ga vivid red rocks and “paleosoils” (Pilbara, Australian) ^[11]

2 陆生动植物的出现与古土壤圈形成

2.1 动物胚胎与陆生植物的出现

早在 20 世纪 70 年代，我国科学家从湖北省宜昌地区西陵峡同期地层发现原位保存在燧石中的新元古代卵囊胚胎化石、连续发育的胚胎和可能成虫化石。2021 年，我国学者再次在该地区发现地球上最早的海绵动物微体化石，命名为“贵州始杯海绵”，填补了动物起源和演化链条中的一个空白环节^[12]。

2005 年王恽和傅强团队^[13]在瓮安陡山沱组磷矿层及贵州等地发现不具维管组织的地衣和陆生维管植物化石实体，揭示了地球陆地植物早期起源的重要证据。在陆生高等植物出现之前，地衣对陆地环境的改造起着重要的作用。地衣是由真菌、绿藻、蓝细菌组成，具有稳定形态和特殊结构的共生复合体，是地球上分布较广泛的先驱植物类型之一。但由于它们本身脆弱，以化石形式保存下来的记录稀少。来自贵州翁安的地衣化石证据^[14]，表明早在 6 亿年前真菌已经与光合自养生物形成共生关系，成就地球生命由海洋登上陆地的“跨越式”。这是迄今已知全世界最早在 6 亿年前就有岩生生物定居或着生，这也意味着高等植物定居形成的原始土壤包括新成土（Primosols）的形成。

2.2 陆地植物参与的土壤形成

前述的生物重大演化事件既标志显生宙时代的开端，也催生土壤发生。伴随生物登陆，理论上最早形成的土壤类型应是新成土，新成土以及其他土

壤类型的形成与发育, 标志着地球上最后形成的一个特殊圈层——土壤圈的出现。这一时期形成的土壤总结起来具有如下特征: 火山砾和晶屑凝灰岩、冰变形(如冰楔等)形态、蒸发成因的盐晶胶结砂粒(Evaporitic sand crystals)、黏粒微集合体定向排列的黏粒物质垒结(Sepic plasmic fabric)、体积收缩和元素迁移、显著相关的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值等^[15]。

新元古代末期埃迪卡拉生物群(Ediacara Biota)是宏体多细胞生物组合, 这一生物群揭示动物起源和早期演化具有重要意义, 同时对于土壤形成也具有指示意义。埃迪卡拉系古土壤的发现支持了埃迪卡拉生物群主要为陆相地衣或者微生物群落^[16], 从而引发极大争议, 有研究认为埃迪卡拉生物群主要是海相无脊椎动物或藻类^[17]。

2.3 土壤功能与宜居地球环境的形成

地质历史时期土壤的形成具有划时代意义, 并最终进入了现知其他行星所没有的高等生命与自然和谐共生、生态系统繁荣昌盛的特殊境界, 为人类文明的兴起和发展奠定了基础: 供给绿色植物生长所需水分、养分, 为植物生长提供机械支撑, 降解环境污染物, 保持微生物的生物多样性等等, 为陆生维管植物在陆地表面着生的大转变提供了前提。随着树木状植物和种子植物的相继出现, 到晚泥盆世, 植物已经占据了干燥严苛的高地陆生环境, 成了主宰地球陆地生态系统最重要的力量之一。与此同时, 土壤也紧随植被的演化而加速形成与发育进程, 这是地球上植物界和土壤界的第一次大发展(图4)。随土壤形成与持续演化, 土壤的生态功能逐渐强化。泥盆纪中期随着乔木出现, 植被光合作用增强, 生物固碳效应大幅度提升, 导致大气中 CO_2



图4 中生代古土壤及其中植物根系痕迹(四川龙泉驿)
Fig. 4 Mesozoic paleosols and root traces (Longquanyi, Sichuan)

浓度明显降低, 这可能诱发了晚泥盆纪冰期并与生物大灭绝事件有关^[18]。

近年来, 位于低纬度地区基性岩、超基性岩的大规模强烈风化成土作用, 因其含斜长石、辉石、橄榄石等含 Ca、Mg 造岩矿物与大气 CO_2 反应而分解, 在形成土壤的同时消耗大量 CO_2 (图5)^[19]。相对其他硅酸盐岩, 作为基性岩代表性岩石类型的玄武岩风化速率快, 消耗 CO_2 量约为全球硅酸盐岩消耗 CO_2 量的三分之一, 可调节全球气候, 促进宜居地球演进。为缓解全球环境变化, CO_2 捕集、利用和封存技术受到广泛重视。而硅酸盐岩风化成土过程增汇作用可视为碳中和技术的理论基础之一, 现已开展农田施用玄武岩试验研究, 且表明具有可行性^[20]。



图5 出露地表的~260 Ma 前玄武岩强烈风化形成的厚层古土壤(云南昭通)
Fig. 5 ~260 Ma deep paleosols by intensive weathering of basalts (Zhaotong, Yunnan)

3 结 语

土壤起源是一个连续过程^[21-23], 土壤圈的形成与演化也是地球表层系统形成过程的重要事件。对古生物学以及生物圈认识的不断深化、岩石圈相关理论的不断拓展均极大促进了土壤起源与地质历史时期的相关研究。隐生宙时期的古风化壳被地质学家作为古土壤, 以解密远古地球环境变化的信息。随寒武纪的到来, 地球最早时期动物胚胎化石的发现开辟了早期生命的先河, 陆生植物的出现有可靠的实体化石记录, 土壤学家定义的土壤也就从距今约6亿年前新元古代开始演化。

地质历史时期土壤形成过程及其与地球表生环境发育具有紧密的相互作用。古土壤在地质、气候、生物演化以及重大环境突变事件下形成、发育，各种类型古土壤分布相应地在时空尺度上扩张、收缩，或被侵蚀殆尽、被埋藏并潜伏于地层中。古土壤发育与演化过程又作用于气候系统、景观、地形、生态系统、生物环境以及大气化学和地球化学循环，影响、反馈、调节全球或地区的表层系统，促进宜居地球的形成。

我国有独特而丰富的地质古生物资源，地层剖面连续完整，化石和古土壤类型丰富多样，是世界地质古生物学和古土壤学研究最关键和富潜力的地区之一。土壤在地球上具有独特的地位，既是地球生态系统的组成部分，也是与陆生原始和高等植物、大气环境、风化、地表侵蚀与沉积等协同进化的产物。加强古土壤学上溯到新元古代乃至太古宙的远古土壤学协作研究，将可为进一步理解宜居地球的形成开创新的一页。

致谢 感谢中国科学院南京土壤研究所黄标研究员提供了宝贵意见和部分图片支持。

参考文献 (References)

- [1] Tate R. Opportunities in basic soil science research[J]. *Soil Science*, 1992, 157: 60.
- [2] Li T J, Ning D T, Xue J Y, et al. Principles of environmental Geoscience [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 1—459. [李天杰, 宁大同, 薛纪渝, 等. 环境地学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 1—459.]
- [3] Retallack G J. Soil of the Past[M]. Chichester: Wiley, 2019: 534.
- [4] Jenny H. Factors of Soil Formation[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1941.
- [5] Rye R, Holland H D. Paleosols and the evolution of atmospheric oxygen: A critical review[J]. *American Journal of Science*, 1998, 298 (8): 621—672.
- [6] Wang P X, Tian J, Huang E Q. The Earth System and Its Evolution [M]. Beijing: Science Press, 2018. [汪品先, 田军, 黄恩清. 地球系统与演变[M]. 北京: 科学出版社, 2018.]
- [7] Crowe S A, Døssing L N, Beukes N J, et al. Atmospheric oxygenation three billion years ago[J]. *Nature*, 2013, 501 (7468): 535—538.
- [8] Campbell I H, Allen C M. Formation of supercontinents linked to increases in atmospheric oxygen[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1 (8): 554—558.
- [9] Zhu M Y. Uncover the origin of animals, the historical process of the Cambrian outbreak and the background of the earth's environment // Sha J G. Leap of the century: Brilliant Chinese Paleontology [M]. Beijing: Science Press, 2009. [朱茂炎. 揭秘动物起源和寒武纪大爆发的历史过程以及地球环境背景//沙金庚. 世纪飞跃: 辉煌的中国古生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [10] Retallack G J, Noffke N. Are there ancient soils in the 3.7 Ga Isua Greenstone Belt, Greenland?[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 514: 18—30.
- [11] Blaustein R. The Great Oxidation Event: Evolving understandings of how oxygenic life on Earth began[J]. *BioScience*, 2016, 66: 189—195.
- [12] Yin Z J. Paleontology has a bright future[N]. *Yangzi Evening News*, 2021-09-08. [殷宗军. 古生物学征程也是星辰大海[N]. 扬子晚报, 2021-09-08.]
- [13] Wang Y, Fu Q. The early evolution of terrestrial plants on earth// SHA J G. Leap of the century: Brilliant Chinese Paleontology [M]. Beijing: Science Press, 2009: 320-328. [王怿, 傅强. 地球陆地植物的早期演变——绿遍山原//沙金庚. 世纪飞跃: 辉煌的中国古生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 320—328.]
- [14] Yuan X L, Zhou C M, Xiao S H. Early eukaryotes and their fossil evidence// SHA J G. Leap of the century: Brilliant Chinese Paleontology [M]. Beijing: Science Press, 2009: 12—15. [袁训来, 周传明, 肖书海. 早期真核生物及其化石证据//沙金庚. 世纪飞跃: 辉煌的中国古生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 12—15.]
- [15] Retallack G J. Field and laboratory tests for recognition of Ediacaran paleosols[J]. *Gondwana Research*, 2016, 36: 107—123.
- [16] Retallack G J. Ediacaran life on land[J]. *Nature*, 2013, 493 (7430): 89—92.
- [17] Xiao S H, Droser M, Gehling J G, et al. Affirming life aquatic for the Ediacara biota in China and Australia[J]. *Geology*, 2013, 41 (10): 1095—1098.
- [18] Retallack G J. Early forest soils and their role in Devonian global change[J]. *Science*, 1997, 276 (5312): 583—585.
- [19] MacDonald F A, Swanson-Hysell N L, Park Y, et al. Arc-continent collisions in the tropics set Earth's climate state[J]. *Science*, 2019, 364 (6436): 181—184.
- [20] Beerling D J, Kantzas E P, Lomas M R, et al. Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands[J]. *Nature*, 2020, 583 (7815): 242—248.
- [21] Yong W L. Geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 1986. [雍万里. 地理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986.]

- [22] Ding Z. Understanding Nature: A study of the natural background of the origins of civilization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 1—369. [丁照. 理解自然: 文明起源自然背景初探[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 1—369.]
- [23] Zhang L S, Fang X Q. Chinese paleogeography -- The formation of Chinese natural environment[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张兰生, 方修琦. 中国古地理——中国自然环境的形成[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]

(责任编辑: 檀满枝)