



News & Focus

沙漠“土壤化”：沙漠化的生态力学解决方法

易志坚，赵朝华

Department of Mechanics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China

沙漠化是指土地的退化[1-4]。作为一个严重的全球性环境问题，沙漠化已经引起了国际社会的广泛关注。1994年，联合国通过了《联合国防治荒漠化公约》[4]。从那时起，世界各国在防治沙漠化方面做出了不懈的努力[5-12]。然而，沙漠化的蔓延并没有得到有效的控制，情况甚至变得更糟：它正在以每年50 000~70 000 km²的速度扩张[13,14]。目前，遭受全球沙漠化威胁的沙漠面积和其他干旱地区的土地面积已达地球陆地面积的41.3% [2,15-17]。在中国，沙漠化土地的面积已达1.73×10⁶ km²，占国土总面积的18.03%，并且另有3.1×10⁵ km²的土地有明显沙漠化的趋势[18]。

沙漠治理是一个全球性的挑战。现行的沙漠治理方法可分为三类：工程治沙、化学治沙和植物治沙[1,9-12,19]。这些方法在沙漠治理中发挥着积极的作用。工程治沙是通过建立草方格沙障和沙栅栏等障碍物来阻止沙子的移动；化学治沙是通过向沙漠表面喷洒乳化沥青或聚合物乳胶等来固化沙子表层；植物治沙是通过种植沙生植物来修复沙漠。然而，以上这些方法均不能改变沙子的材料特性，使其获得土壤特性。

沙漠“土壤化”是笔者在沙子“土壤化”的基础上提出的一个科学命题，是沙漠治理普遍方法的一个有潜力的替代方法。沙子“土壤化”，即沙变土，是笔者在土壤生态力学属性的基础上发现并实现的一个奇妙转化。Yi等首次发现土壤的力学特性和生态属性密切相关[20]。土壤在湿时为流变状态，在干时为固体状态，并且可以在这两种状态之间稳定转换。土壤的这种力学特

性赋予了其自修复和自调节这两大生态力学属性。Yi等的分析表明[20]，土壤的自修复和自调节这两大生态力学属性是使其保持生生不息的生态循环及成为植物理想载体的前提条件，一旦丧失，土壤就会退化，并出现两种极端情形——土壤板结或土壤沙漠化。基于以上发现，Yi等通过在沙子颗粒之间施加适当的约束，实现了沙子“土壤化”。

按地质学或工程学的定义[19,21]，沙子通常处于离散状态，其颗粒之间的约束为接触约束。当在沙子颗粒中加入适当黏度的水溶性物质并均匀混合后，沙子颗粒间将形成具有“万向性”和“可恢复性”的全方位综合(ODI)约束，沙子将从离散状态转变为流变状态(湿土)[20]。当添加的水溶性物质中的水分蒸发后，ODI约束将转化为固结约束，沙子将转变成固体状态(干土)。“土壤化”后的沙子具有自然土壤的力学性能，可以在流变状态和固体状态之间稳定转换。因此，“土壤化”的沙子具有与土壤相同的生态力学属性。由于沙子颗粒间的ODI约束通过加入水溶性物质形成，“土壤化”的沙子对水分、养分和空气具有很强的存储能力。可见，由沙子变成的“土”与自然土壤在力学特性和生态属性上没有区别。Yi发现，沙子一旦被“土壤化”，就会变得适合植物生长，成为植物的理想载体[22]。

从2013年开始，笔者在中国重庆市南岸区两处户外试验地(面积分别为550 m²和420 m²)进行了种植试验。试验模拟了沙漠沙层的渗透条件——先在地面上铺设20~30 cm厚的碎石层，再在碎石层上铺设15~25 cm厚

的未作任何处理的普通河沙(购买的无含泥量的建筑河沙),然后,将细度模数分别为1.22、2.97和3.71的三种类型的洁净河沙与由植物提取的一种改性羧甲基纤维钠(CMC)溶液(溶液中包含2%的改性CMC和5%的复合肥料)以1:0.15的重量比混合,得到沙变土,并按10~20 cm的厚度分别铺设在纯沙层上。除了河沙,其他几种颗粒材料(包括由石料制成的机制沙、混有机制沙的河沙以及混有锯末的河沙)在“土壤化”后也被用于种植试验。笔者在“土壤化”的沙子里种植了多种多样的植物[图1(a)],如稻谷[图1(b)]、玉米[图1(c)]和红薯[图1(d)]等。种植至今,这些植物每年都经受住了当地频繁暴雨和连晴高温的考验。在连晴高温期间,按不同时间间隔为植物适当补水。这些植物每年两熟,在不同“土壤”中的生长均十分繁茂。试验地中的约束材料仅在2013年春天首次对沙子“土壤化”时使用,之后,除了从2014年开始每年添加适量的复合肥料外,未再继续添加约束材料。2014年和2015年,笔者将试验地中产出的玉米、红薯、土豆、萝卜和油菜与附近自然土壤里产出的同种庄稼进行了比较。结果表明,试验地中庄稼的产量均明显更高,其中,土豆、红薯和萝卜等土中生长的块茎或块根植物的个头和产量均提高50%以上(其机理将在笔者后续土壤生态力学的论文中论述)。种植试验表明,沙变土并没有因为暴雨的冲刷而变回到原始的离散颗粒,

相反地,需水量大的沙变土的表层(如种植水稻的地块)还结出了较厚的藻类结皮[图1(e)],对其下土壤颗粒之间的约束起到了保护作用。随着反复的种植和收割,“土壤化”的沙子的团粒结构越来越接近自然土壤,生态力学属性也越来越稳定。在第一次收割三个月后,“土壤”中就发现了很多动物,如蚂蚁、蚯蚓、蜈蚣和昆虫幼虫等[图1(f)]。

上述种植试验验证了“土壤化”的沙子是植物生长的理想载体,且其生态力学属性能够长期保持。

基于沙子“土壤化”,笔者提出了沙漠“土壤化”的命题。沙漠“土壤化”就是使沙漠表层的沙子“土壤化”,其科学实质是使沙漠表层的沙子获得土壤的力学特性和生态属性。从原理上讲,沙漠“土壤化”是沙漠化的逆过程,具有实现人类沙漠变绿洲梦想、改善沙漠地区生态环境、最终造福人类的潜力。

为验证沙漠“土壤化”的可行性,2016年4月,笔者在中国内蒙古的乌兰布和沙漠进行了大规模的种植试验。乌兰布和沙漠占地面积约10 000 km²,海拔约1100 m,降雨量少(年均降雨量仅102.9 mm)且风蚀严重,是中国沙漠化最严重的地区和最难治理的沙漠之一。试验地位于北纬39°36′32″、东经106°39′02″,平均海拔为1110 m(图2)。由于乌兰布和沙漠的地下水资源十分丰富(储备容量约为 5.7×10^9 m³),试验中用于沙子“土壤化”

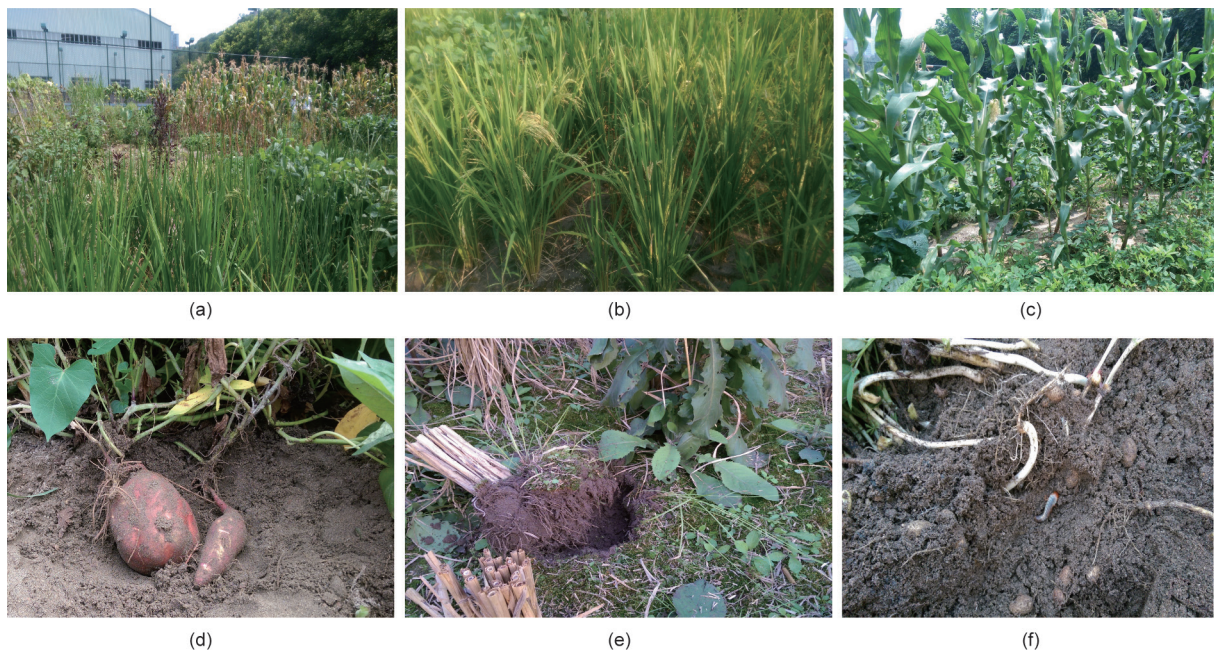


图1.“土壤化”的沙子里:植物生长的理想载体。(a)“土壤化”的沙子里生长的各种植物;(b)“土壤化”的细粒径沙子里生长的稻谷;(c)“土壤化”的粗粒径沙子里生长的玉米;(d)“土壤化”的中粒径沙子里生长的红薯;(e)稻谷收割后,在“土壤”表面形成的藻类结皮;(f)“土壤化”的沙子里的昆虫幼虫。

和植物灌溉的水均来自地下水。沙变土过程中，约束材料(如改性CMC)的添加量仅占沙子质量的0.1%~0.4%，同时添加约占沙子质量0.3%的氮磷钾复合肥，将这些用搅拌机混合后，以平均10 cm的厚度铺设在沙漠表面[图2(a)]。“土壤化”的沙子具有很强的储水能力[图2(b)]。试验地采用了雾化喷灌系统[图2(c)]。为了探索沙漠“土壤化”的大规模机械化施工，笔者使用了旋耕机施工[图2(d)]。为了探索沙漠“土壤化”的大规模机械化施工，笔者使用了旋耕机施工

[图2(d)]，施工面积达2000 m²。结果表明，该施工方法切实可行。从2016年5月20日开始，笔者在试验地中种植了大约50种不同植物的种子或种苗，包括高羊茅、波斯菊、小麦、玉米、向日葵、沙枣树和杨树等[图2(e)]。目前，70多种植物(其中20多种可能是由风或鸟类带来)在试验地中健康且旺盛地生长[图3(a)~(e)]。除此之外，“土壤化”的沙子中还形成了藻类结皮，这就表明，一

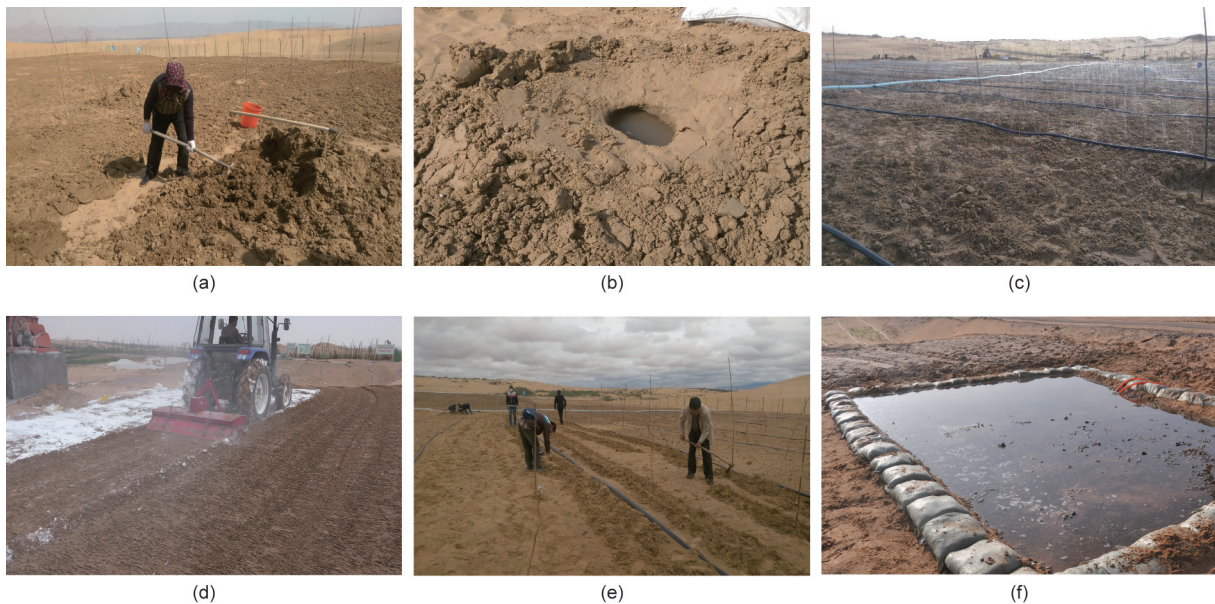


图2. 乌兰布和沙漠沙子“土壤化”。(a) 将“土壤化”的沙子铺筑到沙漠表面；(b) 在“土壤化”的沙子形成的20 cm深坑中加满水24 h后，深坑中保留的水；(c) 雾化灌溉系统；(d) 沙漠表层沙子“土壤化”的旋耕机械施工；(e) “土壤化”的沙子中的植物种植；(f) “土壤化”的沙子中修筑的水田(水田四周用装满“土壤化”的沙子的袋子堆砌田坎)。

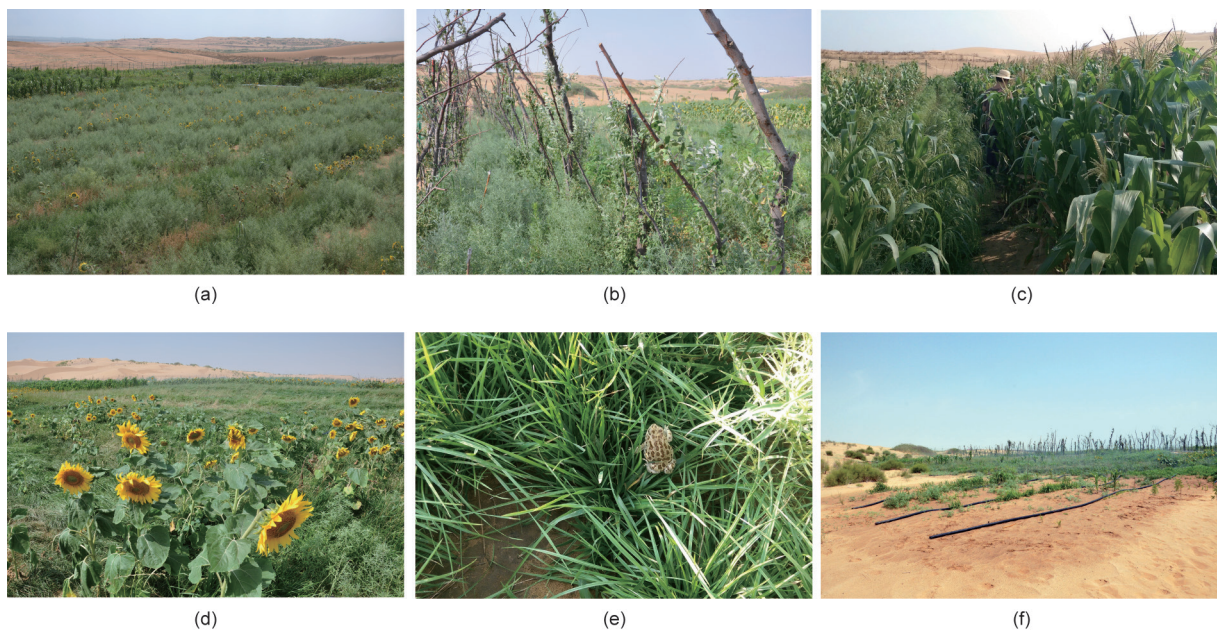


图3.“土壤化”的沙漠中生长出各种各样的植物。(a) “土壤化”的沙漠中生长着超过70种植物；(b) 沙枣树和草；(c) 玉米和糜子；(d) 向日葵和草；(e) 草丛中的青蛙；(f) 相同播种、浇水和施肥情况下，未经处理的沙漠沙子中长出的植物稀少。

个新的不同于沙漠的生态系统正在形成。各种动物，如蝴蝶、蚊子、蚂蚁、鸟、老鼠和青蛙等也生活在试验地中，狐狸和獾等动物还会不时光顾其中。

为与所得试验结果进行比较，笔者在试验地附近的3块未经任何处理的沙漠地块开展了种植试验。试验结果表明，尽管采用了相同的播种、浇水和施肥方法，由于沙子不具有土壤的生态力学属性及其无法抵抗风蚀，这3个地块上长出的植物十分稀少[图3(f)]。

当约束材料(如改性CMC)的添加量达到沙子质量的1.0%时，“土壤化”的沙子具有更强的储水能力，甚至具有类似泥浆的防渗能力。为充分利用约束材料的这种特性，笔者利用“土壤化”的沙子修筑了两块水田[图2(f)]，以便在其中种植水生植物。

沙漠实地种植试验证实，“土壤化”的沙子非常适宜植物生长，并且具有很强的防止风蚀的能力。众所周知，乌兰布和沙漠移动严重，而我们的试验地恰恰位于两个沙丘中间风力较大的风口地带。在周围未改造区域的沙子发生了明显移动的同时，“土壤化”的沙子成功地抵御住了风蚀沙害。“土壤化”的沙子能够抵御风蚀的原因在于，无论是在湿时的流变状态下，还是在干时的固体状态下，其颗粒之间如自然土壤一样被约束成团，不存在散状颗粒。

实现沙子“土壤化”的方法是基于颗粒的约束原则。使用的约束材料为由植物提取的改性CMC溶液，该溶液可被用作食品添加剂，无毒、无害、成本低、掺量低(1%~5%的水溶液就非常黏稠)且适合大规模生产。如果采用旋耕等机械化施工方法，在沙变土中耕种与普通土地中耕种的工作量相差无几。从经济性的角度来看，沙漠“土壤化”的材料费用和机械化施工的成本约为每公顷4500~6500美元。

土壤的自然形成通常需要成千上万年时间。然而，基于沙子“土壤化”，沙子可以迅速转化为“土壤”并成为植物生长的理想载体。沙漠“土壤化”是力学、生态学、土壤学和植物学等学科的交叉研究成果，能够从根本上解决沙漠治理中沙子易移动、保水性差和不适宜植物生长等难题。笔者相信，沙漠“土壤化”的实施将促进跨学科的研究，催生新的学科和产业。土壤退化已经引发了一系列的全球性环境问题[23-25]。沙漠“土壤化”种植的大规模实施，有望重构一个全新、繁荣、稳定的沙漠生态系统，为解决森林退化、生物多样性丧失和气候变化等全球性环境问题提供新的方案[16,26-28]。但是，大规模的沙漠治理必须考虑由地下水开采过度或

地下水开采不当带来的相关风险，同时，采取适当措施应对大量沙漠“土壤化”带来的区域性气候改变及生物多样性变化等潜在影响。因此，大规模的沙漠治理必须建立在科学且严格的生态评估基础上，可优先选择水资源丰富地区进行逐步推广[29-32]。

References

- [1] Grainger A. The threatening desert: controlling desertification. London: Earthscan Publications Ltd.; 2013.
- [2] Adeel Z, Safriel U, Niemeijer D, White R, de Kalbermatten G, Glantz M, et al. Ecosystems and human well-being: desertification synthesis: a report of the millennium ecosystem assessment. Washington, DC: World Resources Institute; 2005.
- [3] Mainguet M. Desertification: natural background and human mismanagement. 2nd ed. Berlin: Springer Science & Business Media; 1994.
- [4] The United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD): elaboration of an international convention to combat desertification in countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa, U.N. Doc. A/AC.241/27, 33 I.L.M.1328 (Sep 12, 1994).
- [5] Johnson PM, Mayrand K, Paquin M, editors. Governing global desertification: linking environmental degradation, poverty and participation. Hampshire: Ashgate Publishing Limited; 2006.
- [6] Wang F, Pan X, Wang D, Shen C, Lu Q. Combating desertification in China: past, present and future. Land Use Policy 2013;31:311-3.
- [7] Li ZB, Li P, Huang PP, Liu XJ. Comprehensive Chinese government policies to combat desertification. In: Tsunekawa A, Liu G, Yamanaka N, Du S, editors. Restoration and development of the degraded loess plateau, China. Tokyo: Springer Japan; 2014. p. 123-35.
- [8] Wang G, Wang X, Wu B, Lu Q. Desertification and its mitigation strategy in China. J Resour Ecol 2012;3(2):97-104.
- [9] Wang T, editor. Deserts and aeolian desertification in China. Beijing: Science Press; 2011.
- [10] Ci LJ, Yang XH. Desertification and its control in China. Beijing: Higher Education Press; 2010.
- [11] Wang T, Zhao HL. Fifty-year history of China desert science. J Desert Res 2005;25(2):145-65. Chinese.
- [12] Wang T, Chen GT, Zhao HL, Dong ZB, Zhang XY, Zheng XJ, et al. Research progress on aeolian desertification process and controlling in north of China. J Desert Res 2006;26(4):507-16. Chinese.
- [13] Ezcurra E. Global deserts outlook. Nairobi: United Nations Environment Programme; 2006.
- [14] Saier MH Jr. Desertification and migration. Water Air Soil Poll 2010;205(S1):31-2.
- [15] Davies J, Ogali C, Laban P, Metternicht G. Homing in on the range: enabling investments for sustainable land management. Nairobi: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, Commission on Ecosystems Management; 2015.
- [16] Reynolds JF, Smith DMS, Lambin EF, Turner BL 2nd, Mortimore M, Batterbury SPJ, et al. Global desertification: building a science for dryland development. Science 2007;316(5826):847-51.
- [17] Safriel U, Adeel Z, Niemeijer D, Puigdefabregas J, White R, Lal R, et al. Dryland systems. In: Hassan R, Scholes R, Ash N, editors. Ecosystems and human well-being: current state and trends. Washington, DC: Island Press; 2005. p. 623-62.
- [18] State Forestry Administration of the People's Republic of China. The national prevention and control of desertification plan (2011-2020). 2013. Chinese.
- [19] Pye K, Tsoar H. Aeolian sand and sand dunes. 2nd ed. Berlin: Springer Science & Business Media; 2009.
- [20] Yi ZJ, Zhao CH, Gu JY, Yang QG, Li Y, Peng K. Why can soil maintain its endless eco-cycle? The relationship between the mechanical properties and ecological attributes of soil. Sci China-Phys Mech Astron 2016;59(10):104621.
- [21] Chen WF, Liew JYR, editors. The civil engineering handbook. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 2002.
- [22] Yi ZJ, inventor. Modified sand. China Patent CN 201310223390.4. 2013 Jun 6.
- [23] Le QB, Nkonya E, Mirzabaev A. Biomass productivity-based mapping of global land degradation hotspots. In: Nkonya E, Mirzabaev A, von Braun J, editors. Economics of land degradation and improvement—a global assessment for sustainable development. Cham: Springer International Publishing AG; 2016. p. 55-84.
- [24] Amundson R, Berhe AA, Hopmans JW, Olson C, Sztein AE, Sparks DL. Soil and human security in the 21st century. Science 2015;348(6235):1261071.
- [25] Lal R. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. BioScience 2010;60(9):708-21.
- [26] Nasi R, Wunder S, Campos AJJ. Forest ecosystem services: can they pay our

- way out of deforestation? Bogor: CIFOR for the Global Environmental Facility; 2002.
- [27] Collen B, Kock R, Heinrich M, Smith L, Mace G. Biodiversity and ecosystems. In: Waage J, Yap C, editors *Thinking beyond sectors for sustainable development*. London: Ubiquity Press; 2015. p. 3–9.
- [28] Reed MS, Stringer LC. Climate change and desertification: anticipating, assessing and adapting to future change in drylands. In: *The 3rd UNCCD Scientific Conference on “Combating Desertification/Land Degradation and Drought for Poverty Reduction and Sustainable Development: The Contribution of Science, Technology, Traditional Knowledge and Practices”*; 2015 Mar 9–12; Cancún, Mexico; 2015.
- [29] Wang L, Yao T, Xu F, Han F, Guo C, Wang F, et al. Ecological environment conservation and restoration and sustainable development of Minqin oasis. *J Landscape Res* 2016;8(1):13–7.
- [30] Wang G, Zhao W. The spatio-temporal variability of groundwater depth in a typical desert-oasis ecotone. *J Earth Syst Sci* 2015;124(4):799–806.
- [31] Pittock J, Hussey K, Stone A. Groundwater management under global change: sustaining biodiversity, energy and food supplies. In: Jakeman AJ, Barreteau O, Hunt RJ, Rinaudo JD, Ross A, editors *Integrated groundwater management: concepts, approaches and challenges*. Cham: Springer International Publishing AG; 2016. p. 75–96.
- [32] Bestelmeyer BT, Okin GS, Duniway MC, Archer SR, Sayre NF, Williamson JC, et al. Desertification, land use, and the transformation of global drylands. *Front Ecol Environ* 2015;13(1):28–36.