

# 红壤区夏玉米生长对土壤穿透阻力的响应

罗敏<sup>1,2</sup>, 邓才富<sup>1</sup>, 陈家宙<sup>2</sup>, 高跃<sup>2</sup>, 高冰可<sup>2</sup>

(1. 重庆市药物种植研究所, 中国医学科学院药用植物研究所重庆分所, 重庆 408435;

2. 华中农业大学 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 为寻求有效措施改善土壤穿透阻力, 缓解季节性干旱对南方红壤地区农业生产的影响, 通过室内3个土壤容重处理(1.1、1.3 g·cm<sup>-3</sup>和1.5 g·cm<sup>-3</sup>)模拟初始土壤阻力, 及大田4种耕作措施(深耕D、常规耕作C、免耕N和压实P)调控土壤阻力, 通过盆栽与大田小区试验研究了红壤穿透阻力对玉米根系、植株生长及产量的影响。结果显示, 轻旱至中旱情况下, 玉米生长对红壤穿透阻力胁迫响应强烈。根长、表面积及根系体积表现为D1.1 > D1.3 > D1.5, 根径则与之相反; 地上部指标和产量为D > C > N > P; 除根径以外的根系形态指标、地上部生长指标和产量均与土壤穿透阻力呈显著负相关, 且深耕的玉米生长情况和产量均显著高于免耕和压实。红壤穿透阻力改变了玉米根系生长状况, 限制植株生长从而对产量形成; 红壤阻力每增加1.0 MPa, 籽粒产量将减少1 787.1 kg·hm<sup>-2</sup>。对于红粘土红壤, 深耕能够明显降低土壤穿透阻力减轻干旱影响; 而免耕的土壤阻力高, 既直接胁迫作物生长, 亦不利于缓解季节性干旱。

**关键词:** 土壤穿透阻力; 夏玉米; 季节性干旱; 红壤

**中图分类号:** S156.6; S513 **文献标志码:** A

## Effect of red soil penetration resistance on growth of summer maize

LUO Min<sup>1,2</sup>, DENG Cai-fu<sup>1</sup>, CHEN Jia-zhou<sup>2</sup>, GAO Yue<sup>2</sup>, GAO Bing-ke<sup>2</sup>

(1. Chongqing Institute of Medicinal Plant Cultivation · Institute of Medicinal Plant Development,

Chinese Academy of Medical Sciences, Chongqing 408435, China;

2. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Arable Land Conservation of Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Hua zhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China)

**Abstract:** In order to mitigate the effects of seasonal drought on agricultural production in red soil region of southern China, effective measures were studied to reduce soil penetration resistance (PR). The soil bulk density of 1.1, 1.3 g·cm<sup>-3</sup> and 1.5 g·cm<sup>-3</sup> simulated antecedent soil resistance in indoor pot, and four tillage measures, including deep tillage, conventional tillage, no-tillage and compaction were set to control soil resistance in field. The influence of red soil penetration resistance to roots morphology index, plant growth and yield were explored by comprehensive research on indoor pot and field experiments. The results showed that, during the mild and moderate droughts, the maize growth was greatly affected by the red soil penetration resistance. The orders were D1.1 > D1.3 > D1.5 of root length, root surface area and root volume, but the root diameter was the opposite. And the orders were D > C > N > P of the ground growth indexes and yield. The root morphology indicators except the root diameter, plant growth indicators and the yield were all negatively related to soil penetration resistance. Maize growth and yield of deep tillage were significantly higher than no-tillage and compaction. The soil PR changed root growth and decreased plant growth and yield. When the red soil PR increased 1.0 MPa, the grain yield reduced 1 787.1 kg·hm<sup>-2</sup>. As to the red soil in this study, deep tillage reduced its penetration resistance remarkably and thus mitigated the detrimental effects of drought. But no tillage practice resulted in the high soil penetration resistances, thus reducing crop growth directly.

**Keywords:** red soil; soil penetration resistance; summer maize; seasonal drought; red soil

收稿日期: 2016-09-19

修回日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271240); 重庆市基础科学与前沿技术研究专项(一般)(cstc2016jcyjA0169)

作者简介: 罗敏(1987—), 四川雅安人, 硕士, 助理研究员, 主要从事作物连作障碍和土壤生态环境研究。E-mail: mimmin285233623@163.com。

通信作者: 陈家宙(1968—), 教授, 博士研究生导师, 主要从事土壤水分运动、土壤侵蚀和水土保持研究。

随着农业生产与土壤科学的不断发展,对土壤化学性质、养分状况与作物生长关系的研究日益丰富。土壤物理性质作为土壤最基础的性质,与土壤化学性质、土壤微生物活动等密切相关,互作影响。土壤物理性质制约土壤肥力水平,进而影响植物生长,是制定合理耕作和灌排等农田管理措施的重要依据。因此,在土壤养分状况对作物生长关系丰富的研究背景下,不可忽视土壤物理性质对作物生长的影响研究。

鄂南红壤丘陵区在我国农业发展中占有重要地位<sup>[1]</sup>,但该地区常发生的季节性干旱给农业生产带来极大影响。随着土壤干旱的发生,土壤供水能力变差,土壤穿透阻力亦急剧增大<sup>[2]</sup>,严重影响作物的生长和产量形成。由第四纪红色粘土发育而成的红壤,粘粒含量高<sup>[3]</sup>,一旦含水量降低即会变得十分坚硬。课题组前期研究发现,土壤穿透阻力与干旱对作物的影响存在交互作用,并且在红壤季节性干旱过程中,阻力随干旱发生而急剧增大。因此,作为严重遭受季节性干旱影响的南方红壤,土壤穿透阻力在干旱胁迫过程中对作物生长具有怎样的影响是本文重点探讨的内容。研究干旱引起的土壤穿透阻力对夏玉米生长的影响作用,旨在为进一步寻求有效措施通过改善土壤阻力来缓解季节性干旱的影响提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设置

试验于 2014 年 6—9 月在华中农业大学红壤综合试验站内进行。供试玉米品种为郑单 958,土壤是由第四纪红色粘土发育而成的红壤,土壤质地为粘土(美国制)。试验包括两部分:室内桶栽试验研究红壤阻力对玉米根系的影响,设置三个土壤容重,即 1.1, 1.3, 1.5 g·cm<sup>-3</sup>,分别体现不同的初始红壤阻力值,各处理 5 次重复,每桶播种 3 粒玉米。取试验站内耕层 0~20 cm 的红壤,风干后过 2 mm 筛;选用内径为 25 cm 的 PVC 管自制高为 15 cm 的钵,根据设置容重称取不同重量的风干土,按田间持水量的 75% 加水进行压实。压土时分少量多次加入钵,每次加土整平,再用喷壶均匀喷洒水后用木槌压实,直至全部土壤压入规定的体积内;小容重不用压实,只需每次加土后整平喷水,再加土,如此反复即可。从播种到发芽,每天按称重法充分浇水(土壤含水量在田间持水量的 65%),以保证作物正常发芽及生长,出苗后用完全营养液代替自来水。玉米出现 3 片叶时开始连续干旱处理,模拟干旱过程中红壤阻力的变化过程,并每日称重掌握土壤含水量

情况。

田间小区试验以耕作措施调控红壤阻力,包括深耕 D、常规耕作 C、免耕 N、机械压实 P,每处理 3 次重复,小区面积为 2.7 m × 1.2 m = 3.24 m<sup>2</sup>。各处理小区施肥量相同,施氮(尿素, N ≥ 46%) 140 kg·hm<sup>-2</sup>,过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%) 1 000 kg·hm<sup>-2</sup>和氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 40%) 240 kg·hm<sup>-2</sup>;所用肥料全部作为基肥一次施入。每小区定植 18 株,四周设保护行。2014 年 6 月 18 日播种,9 月 29 日收获。

### 1.2 测定指标与方法

室内试验用测目仪测定土壤阻力,干旱处理 10 d 后测定根系形态指标,采用 Epson 扫描仪扫描,结合根系分析系统(WinRHIZO Pro 2004c)测定。田间试验采用 SC900 土壤硬度仪测定 0~40 cm 土壤红壤穿透阻力,每个处理标记 6 株长势一致植株,采用常规测定方法定期测定玉米地上部生长指标,以上指标同步测定。

### 1.3 数据分析

数据分析结合 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件进行,作图由 Origin 9.0 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 红壤穿透阻力对玉米根系的影响

红壤穿透阻力对玉米苗期根系生长有明显影响。由表 1 可知,不同土壤穿透阻力处理间玉米苗期单株根长和根径差异显著,其中单株总根长与总根径表现最为明显,在三种阻力处理间均存在显著性差异。低阻力处理根长、表面积和根系体积均最大,而高阻力处理则明显减小。根径则与之相反,低阻力处理单株根径最小,高阻力处理最大。

进一步将不同阻力处理下的红壤穿透阻力与玉米苗期根长和根径进行相关性分析,结果表明,苗期玉米根长与红壤穿透阻力具有显著的负相关关系( $P < 0.05$ ),根系平均直径与其具有显著的正相关关系( $P < 0.05$ ),如图 1 所示。随着红壤穿透阻力的增加,根系长度变短,平均直径变粗,并且总根长的变化幅度大于种子根,而种子根根径的增粗幅度大于总根。

### 2.2 红壤穿透阻力对玉米地上部的影响

红壤穿透阻力对夏玉米株高、茎粗和叶面积均具有一定影响。由表 2 可知,夏玉米株高在不同阻力调控措施下表现为 D > C > P > N,茎粗和叶面积则为 D > C > N > P;且各指标在措施间的变化差异不尽相同,株高表现为深耕与常规耕作显著高于免耕和压实,茎粗为深耕显著高于免耕和压实,叶面积则是深耕与常规耕作显著高于压实。

表 1 红壤穿透阻力对夏玉米根系的影响

Table 1 Effects of red soil penetration resistance on maize root

处理 Treatment	土壤阻力 Soil resistance /MPa	根长/cm Root length		根径/mm Root diameter		根表面积/cm <sup>2</sup> Root surface area		根系体积/cm <sup>3</sup> Root volume	
		总根 Common root	种子根 Seminal root	总根 Common root	种子根 Seminal root	总根 Common root	种子根 Seminal root	总根 Common root	种子根 Seminal root
		D1.1	0.88c	338.75a	123.86a	0.98c	1.05b	121.0a	62.0a
D1.3	1.93b	246.15b	93.39ab	1.05b	1.17ab	95.9ab	29.2b	2.15ab	0.86b
D1.5	2.72a	229.25c	78.84b	1.22a	1.26a	80.5b	17.3b	1.96b	0.58b

注: D1.1、D1.3、D1.5 代表不同的容重(1.1、1.3、1.5 g·cm<sup>-3</sup>)设置,体现不同的初始土壤穿透阻力值;土壤阻力值为室内干旱处理结束时的耕层均值;同列小写字母代表 0.05 显著水平( $P < 0.05$ );下同。

Note: D1.1, D1.3 and D1.5 indicate soil bulk densities(1.1, 1.3, 1.5 g·cm<sup>-3</sup>), they reflect initial PR; the soil resistances are the mean of arable layer at the end of drought treatment indoor; different lowercases of same column indicate significant difference at 5% level; the same below.

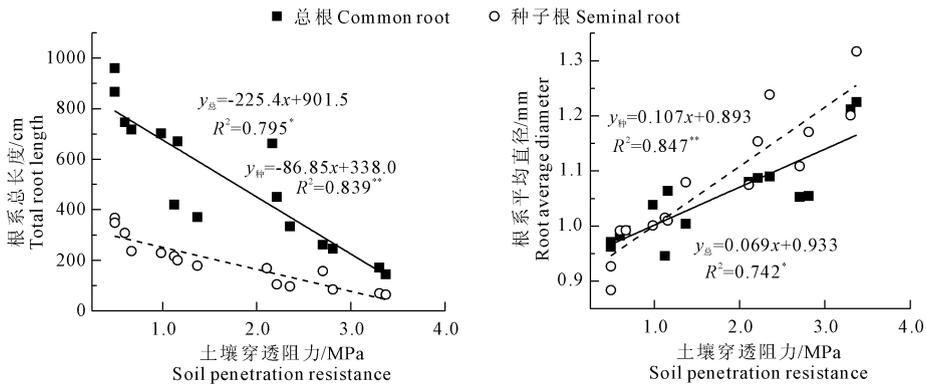


图 1 红壤穿透阻力与玉米总根长及根平均直径的关系

Fig.1 Maize root length and diameter in relation to soil penetration resistance

表 2 红壤穿透阻力对夏玉米生长及产量的影响

Table 2 Effects of red soil penetration resistance on maize growth and yield

处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density /(g·cm <sup>-3</sup> )	土壤阻力 Resistance /MPa	土壤含水量 Soil moisture /(g·kg <sup>-1</sup> )	株高 Plant height /cm	茎粗 Stem diameter /cm	叶面积 Leaf area /cm <sup>2</sup>	籽粒产量 Grain yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )	生物学产量 Biological yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )
深耕(D) Deep tillage	1.35c	1.08c	201.4a	197.7a	2.35a	629.6a	8863.5a	13523.0a
常规耕作(C) Conventional tillage	1.47b	1.70b	190.3a	185.5a	2.18ab	607.6a	7045.7ab	11655.6ab
免耕(N) No-tillage	1.49b	2.36a	174.7b	148.7b	2.09b	526.4ab	5867.6b	11020.2b
压实(P) Compaction	1.59a	2.83a	175.2b	149.2b	1.72c	442.6b	5523.5b	10186.1b

注:生长指标为夏玉米营养生长期结束后测定,土壤容重、土壤穿透阻力与含水量为营养生长期干旱早期 0~20 cm 土层均值。

Note: the growth indexes were determined after vegetative growth phase, and the soil bulk, PR and soil moisture were the mean of 0~20 cm depth of vegetative growth phase in drought period.

进一步将不同阻力调控措施下夏玉米营养生长完成时期的株高、茎粗和叶面积分别与耕层(0~20 cm 土层)红壤穿透阻力进行相关性分析,得出三者均与红壤穿透阻力具有显著的线性关系( $P < 0.05$ )。如图 2 所示,夏玉米株高、茎粗、叶面积与红壤穿透阻力呈显著负相关关系,随红壤穿透阻力增大,株高降低,茎粗与叶面积减小。由此可知,红壤穿透阻力严重影响了夏玉米植株的生长。

### 2.3 红壤穿透阻力对玉米产量的影响

红壤穿透阻力对夏玉米籽粒产量具有明显影响。表 2 表明,不同阻力调控措施下玉米的籽粒产量表现为  $D > C > N > P$ 。其中,深耕比常规耕作、免耕和压实分别高 25.8%、51.1% 和 60.5%,且深耕显著高于免耕和压实。红壤穿透阻力对夏玉米生物学产量具有相似的影响,各阻力调控措施间的大小排序与籽粒产量相同,且深耕与免耕、压实间有显著性差异。进一步的相关性分析表明(图 3),阻力调

控措施下夏玉米籽粒产量与红壤穿透阻力具有显著负相关关系,红壤阻力每增加 1.0 MPa,籽粒产量将减少 1 787.1 kg·hm<sup>-2</sup>。可见,红壤穿透阻力不但在

作物生长过程中对根系、地上部等产生显著影响,而且最终会表现为严重影响其产量的形成。

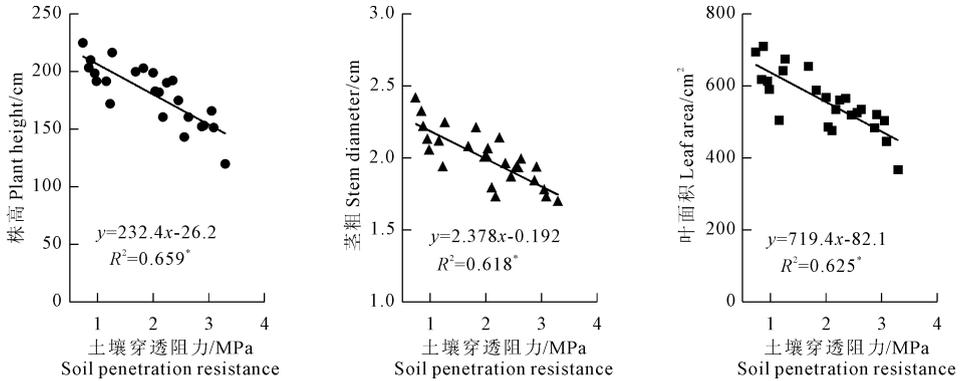


图 2 红壤穿透阻力与玉米地上部生长的关系

Fig.2 The ground growth indexes of maize in relation to soil penetration resistance

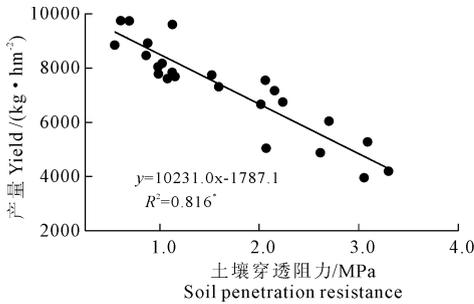


图 3 红壤穿透阻力与夏玉米产量的关系

Fig.3 Yield of maize in relation to soil penetration resistance

### 3 讨论与结论

土壤穿透阻力对植物生长的影响,首先表现为对根系生长的直接影响作用。当前多数研究者认为根系生长所遇到的土壤机械阻力普遍存在。玉米根系生长指标随土壤容重增加而下降<sup>[4]</sup>;机械阻力会显著降低玉米、水稻等 4 种不同作物的根伸长速率,且使其根径变粗(水稻除外)<sup>[5]</sup>。本研究中,单独分析因压实不同容重而引起的土壤阻力对根系的影响结论,与以往研究土壤紧实度和容重对作物根系影响的结果相一致<sup>[6-10]</sup>,土壤紧实度阻碍了根的生长<sup>[11]</sup>,导致根系总长度、表面积等显著下降,而根系平均直径变粗。压实导致的土壤容重的变化自然会改变土壤通气状况,增加土壤紧实度,土壤有效水分、气体比例等随之发生改变,因此必然会影响作物根系生长。但与此同时,水分降低所产生的土壤阻力对根系的影响却也不可忽视。

前期研究已经发现,在红壤季节性干旱过程中,

水分减少的同时会导致土壤穿透阻力急剧增大<sup>[12]</sup>。因此,在阻力胁迫与逐渐出现的干旱胁迫的综合影响下,作物根系生长必将受到严重影响,而此一系列影响也将引起地上部的反应,最终表现在作物产量上。多数研究表明较高土壤容重会抑制作物地上部生长<sup>[13-15]</sup>,但也有研究认为该影响不显著甚至没有影响<sup>[16]</sup>。导致研究结果不一的原因一方面与作物种类有关,另外可能也与水分有关,这其中便有因水分变化导致的土壤穿透阻力的改变所带来的影响。本研究发现,在季节性干旱过程中,不同阻力调控措施下,红壤穿透阻力对作物株高、茎粗及叶片生长具有显著负效应,且该负效应最终对产量产生严重影响,夏玉米籽粒产量和生物学产量均与红壤穿透阻力具有显著的负相关关系,随着红壤阻力的增加而减小。在本次试验期间,玉米营养生长期降雨相对丰富,未发生严重的干旱,仅有一次连续干旱 5 d 的轻度干旱,因此未出现干旱胁迫现象。所以,此时主要表现出的是对土壤阻力胁迫的反应,即红壤穿透阻力的影响先于干旱胁迫。

深耕能够明显降低土壤穿透阻力,宜于植株根系生长,从而促进植株对水分和养分的吸收,有助于产量的增加。免耕的土壤阻力仅低于压实处理,且此两种措施下植株生长及产量最低,且二者之间均没有显著性差异。因此,在红壤地区可以通过选择适宜的耕作措施来调控土壤穿透阻力,从而改善因干旱而引起的土壤阻力增大对作物的影响,促进作物生产;同时,作为保护性耕作措施的免耕却不适宜于在红壤地区推广。

## 参 考 文 献:

- [1] 孙 波,董元华,徐明岗,等.加强红壤退化分区治理,促进东南红壤丘陵区现代高效生态农业发展[J].土壤,2015,47(2):204-209.
- [2] Whalley W, Leeds-Harrison P, Clark L, et al. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils [J]. Soil & Tillage research, 2005,84(1):18-27.
- [3] 李成亮,何园球,熊又升,等.四种不同母质发育的红壤水分状况研究[J].土壤,2004,36(3):310-317.
- [4] 郑存德,依艳丽,张大庚,等.土壤容重对高产玉米根系生长的影响及调控研究[J].华北农学报,2012,27(3):142-149.
- [5] Iijima M, Kato J. Combined soil physical stress of soil drying, anaerobiosis and mechanical impedance to seedling root growth of four crop species[J]. Plant Prod Sci, 2007,(10):451-459.
- [6] Haling R, Simpson R, Culvenor R, et al. Effect of soil acidity, soil strength and macropores on root growth and morphology of perennial grass species differing in acid-soil resistance[J]. Plant Cell Environ, 2011,34(3):444-456.
- [7] 冯福学,黄高宝,柴 强,等.不同耕作措施对冬小麦根系时空分布和产量的影响[J].生态学报,2009,29(5):2499-2506.
- [8] 宋 日,刘 利,吴春胜,等.根系生长空间对玉米生长和养分吸收的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(6):58-64.
- [9] 刘晚苟,李良贤,谢海容,等.土壤容重对野生香根草幼苗根系形态及其生物量的影响[J].草业学报,2015,24(4):214-220.
- [10] 闫 娟,徐程扬,魏红旭.土壤紧实度对三倍体毛白杨细根形态的影响[J].东北林业大学学报,2013,47(2):47-50.
- [11] Whitmore A P, Whalley W R, Bird R A, et al. Estimating soil strength in the rooting zone of wheat[J]. Plant Soil, 2011,339(7):363-375.
- [12] 罗 敏,邓才富,陈家宙,等.鄂南红壤穿透阻力的时空变化研究[J].土壤,2016,48(5):1055-1061.
- [13] 张向东,邓寒霜,华智锐.土壤紧实胁迫对桔梗生长、产量及品质的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(7):177-182.
- [14] 王 卉,李清莲,曹玉英.不同耕作方法与土壤容重对玉米生育和产量的影响研究[J].中国农业信息,2013,(3):102.
- [15] 王 群,张学林,李全忠,等.紧实胁迫对不同土壤类型玉米养分吸收、分配及产量的影响[J].中国农业科学,2010,43(21):4356-4366.
- [16] Goodman A, Ennos A. The effects of soil bulk density on the morphology and anchorage mechanics of the root systems of sunflower and maize[J]. Ann Bot-London, 1999,83(8):293-302.
- 
- [26] Enoki T, Kawaguchi H, Iwatsubo G. Topographic variations of soil properties and stand structure in a Pinus thunbergii plantation[J]. Ecological Research, 1996,11(3):299-309.
- [27] Schlesinger W H, Ward T J, Anderson J. Nutrient losses in runoff from grassland and shrubland habitats in southern New Mexico; II. Field plots[J]. Biogeochemistry, 2000,49(1):69-86.
- [28] 安韶山,黄懿梅.黄土丘陵区柠条林改善土壤作用的研究[J].林业科学,2006,42(1):70-75.
- [29] Hillerislambers R, Rietkerk M, van den Bosch F, et al. Vegetation pattern formation in semi-arid grazing systems[J]. Ecology, 2001,82(1):50-61.
- [30] 白军红,李晓文,崔保山,等.湿地土壤氮素研究概述[J].土壤,2006,38(2):143-148.
- [31] Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H L, et al. Spatial heterogeneity of soil properties and vegetation-soil relationships following vegetation restoration of mobile dunes in Horqin Sandy Land, Northern China [J]. Plant and Soil, 2009,318(2):153-167.
- [32] 蒋利玲,何 诗,吴丽凤,等.闽江河口湿地 3 种植物化学计量内稳性特征[J].湿地科学,2014,12(3):293-298.
- [33] Kitayama K. Comment on "Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences" [J]. Science, 2005, 308(5722):633.

(上接第 49 页)