

免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响*

余海英^{1,2} 彭文英³ 马 秀¹ 张科利^{1**}

(¹ 北京师范大学地理与遥感学院, 北京 100875; ² 四川农业大学资源环境学院, 四川雅安 625014; ³ 首都经济贸易大学城市学院土地资源与房地产管理系, 北京 100070)

摘 要 通过2006—2008年的田间试验,研究了北京地区免耕与传统翻耕条件下土壤水分的时空动态及其对土壤相关物理性质的影响。结果表明:研究期间,免耕和翻耕地0~100 cm土层的土壤贮水量随时间及降水变化的趋势一致,但免耕地的土壤贮水量在不同时刻以及不同降雨条件下均高于翻耕地,增幅在2.7%~30.3%,降雨相对充分条件下土壤贮水量的增量有所增加,但免耕在相对缺水的地区更值得推广;免耕地0~100 cm土层的平均土壤含水量明显高于传统翻耕,增幅在3.4%~12.8%,其中表层(0~20 cm)和底层(80~100 cm)的水分增量明显高于中间层次,最高增量可达22.2%;免耕覆盖的耕作方式可通过降低土壤容重、提高土壤孔隙度、促进土壤水稳性团聚体的形成等作用来提高土壤的保水能力和水分利用效率,进而促进作物增收。与对照相比,免耕3年后土壤水分利用率和春玉米产量分别较传统翻耕提高13.3%和16.4%。

关键词 免耕 土壤水分 土壤物理性质 春玉米

文章编号 1001-9332(2011)01-0099-06 **中图分类号** S152.7, S157.4 **文献标识码** A

Effects of no-tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semi-arid region of northern China. YU Hai-ying^{1,2}, PENG Wen-ying³, MA Xiu¹, ZHANG Ke-li¹
(¹*School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; ²*College of Resources and Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China*; ³*Department of Land Resources and Real Estate Management, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(1): 99–104.

Abstract: Field experiments were conducted in 2006–2008 to study the effects of no-tillage on the spatiotemporal dynamics of soil water content and related soil physical properties in spring corn fields in Beijing region during growth season. In study period, the water storage in 0–100 cm soil layer in tillage and no-tillage treatments had the same variation trend with time and precipitation, but the water storage at different time periods and under different precipitations was 2.7%–30.3% higher in no-tillage treatment than in tillage treatment. When the precipitation was relatively abundant, the increment of soil water storage was somewhat increased, but no-tillage was still worth to be popularized in the regions relatively deficit in precipitation. Under no-tillage, the average water storage in 0–100 cm soil layer during the three growth seasons in 2006–2008 was 3.4%–12.8% higher than that under conventional tillage, and the increment of the water storage in 0–20 cm and 80–100 cm soil layers under no-tillage was higher than that in intermediate layer, with the highest increment reached 22.2%. No-tillage improved soil water-holding capacity and water use efficiency via decreasing soil bulk density, increasing soil porosity, and promoting the formation of soil water-stable aggregates, and thereby, promoted crop yielding. After 3 years no-tillage, the soil water use efficiency and spring corn yield were increased by 13.3% and 16.4%, respectively, compared with those under conventional tillage.

Key words: no-tillage; soil water content; soil physical property; spring corn.

* 国家自然科学基金项目(40571092)和北京地区普通高等学校首都经济学科群建设项目资助。

** 通讯作者。E-mail: keli@bnu.edu.cn

2010-04-17 收稿, 2010-10-28 接受。

保护性耕作是相对于传统翻耕的新型耕作技术,以秸秆覆盖、免耕播种、以松代翻、化学除草为特点,具有蓄水保墒、培肥地力、节本增效、防治农田扬尘、减少水土流失、促进农业可持续发展等作用,其在水资源贫乏、风多沙大、植被稀疏、农业生态环境十分脆弱的我国北方旱作农业区具有重要的应用价值^[1].虽然保护性耕作已逐步受到国内外学者的普遍关注,国内学者也相继在河南^[2]、山西^[3]、黄土高原旱原地^[4]、东北黑土区^[5]等地开展了保护性耕作与农业节水^[6]、作物产量^[7]及生态效益^[8]等方面的研究,形成了成熟的耕作技术体系,并取得了大量的研究成果,但由于土壤环境的区域差异较大,这些结果还不能直接照搬,在具体实施前还应根据当地的气候、土壤和农业生产条件进行系统地实践研究,才能最大地发挥其生产、生态效应.为此,本文以华北地区农业生产的重要限制因子——土壤水分切入点,以北京郊区主要推行的1年1熟春玉米(*Zea mays*)种植耕地为对象,在昌平地区布设大田试验,对比研究了免耕和传统翻耕条件下的水土效应,分析了不同耕作方式对土壤水分时空动态变化及土壤相关物理性质的影响,以期在北京郊区免耕效应评价和田间管理提供科学依据.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于北京市昌平区兴寿镇桃林村(40°13' N, 116°25' E)的大田中.该区域属温带大陆性半干旱季风气候,全年四季分明,年均气温11.8℃,年均降水量579.1 mm,降水年内分布不均,主要集中在6—9月.试验区土壤为潮土,土层深厚,地下水埋深10 m以下,土壤基础肥力较好.农业生产主要推行1年2熟的冬小麦—夏玉米和1年1熟的春玉米耕作制度,由于小麦生产投入多、效益差,农民种植积极性普遍不高,因此试验地选种春玉米.耕作上,当地多采用秋翻地晾垡晒垡技术,冬春季有近半年时间的土地休闲,由于北京地区冬、春季节气候干旱、多风,裸露的耕地极易产生扬尘.据相关研究,以传统耕作方式形成的翻耕裸露农田,已成为北京生态环境的重要污染源^[1].

1.2 试验设计

2006年4月至2008年9月进行试验.为了单纯比较耕作方式对土壤水分和相关土壤物理性质的影响,了解区域土壤环境对耕作方式的自然适应性,本文中的大田试验完全不进行灌溉.在对试验区全面

调查的基础上,选择有代表性的样地作为试验田.试验共设2个处理:传统翻耕(CT),玉米收获后留茬20~30 cm,其余秸秆全部收获,次年春播前翻耕土地,翻耕深度约30 cm;免耕覆盖(NT),全年不翻耕,标准免耕机粉碎玉米秸秆后覆盖地表,秸秆粉碎后长度<10 cm,用量7500 kg·hm⁻²,次年春播时采用免耕播种机一次性完成施肥和播种.每个处理在田间以20 m×5 m规格分别布设2个大田小区,区间间隔1 m,小区四周作垄与大田分隔.每个试验小区除耕作方式和除草剂的使用不同外,其余田间管理均相同,其作物间距、作物播种量和作物品种均与当地农作习惯一致.

1.3 研究方法

在春玉米整个生长期(4—9月),采用天津气象仪器厂生产的SDM6A型雨量器测定降雨量,并每两周监测土壤0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm土层的土壤含水量,10月至次年3月停止监测.每个样地设3个取样点,每土层取3个重复.用土钻分层取土,并用烘干法(105℃下烘10~12 h)测定土壤质量含水量,土壤水分取平均值.

在免耕3年后(即2008年),春玉米收获后测定两种耕作方式下土壤剖面各土层的容重(环刀法测定)以及耕层的机械组成(吸管法测定)和土壤团聚体组成(干筛和湿筛法测定).相关参数的计算方法为:1)土壤贮水量 $D_m = \theta_m \cdot \rho \cdot h$ ^[9],式中: D_m 为土壤贮水量(mm); θ_m 为土壤质量含水量; ρ 为土壤容重(g·cm⁻³); h 为土壤厚度(mm).2)春玉米籽实水分利用效率 $WUE (kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}) = Y/ET$ ^[10],式中: Y 为春玉米籽实产量(kg·hm⁻²); ET 为蒸散量(mm), $ET = P - \Delta S$,其中, P 为作物生长期间的降水量(mm), ΔS 为收获期与播种期土壤贮水量之差(mm).

2 结果与分析

2.1 北方旱作玉米地土壤贮水量随时间及降水的变化特征

在春玉米整个生长期,研究区免耕和翻耕地0~100 cm土层的土壤贮水量随时间及降水的变化趋势一致,且免耕土壤的贮水量在不同时刻和不同降雨条件下均高于翻耕土壤(图1),这与免耕覆盖对土壤水分蒸发的抑制作用及其对土壤物理性质的改善密切相关.免耕有利于降低土壤容重、增加土壤孔隙度、提高液相所占比例,使其三相比更趋近于农

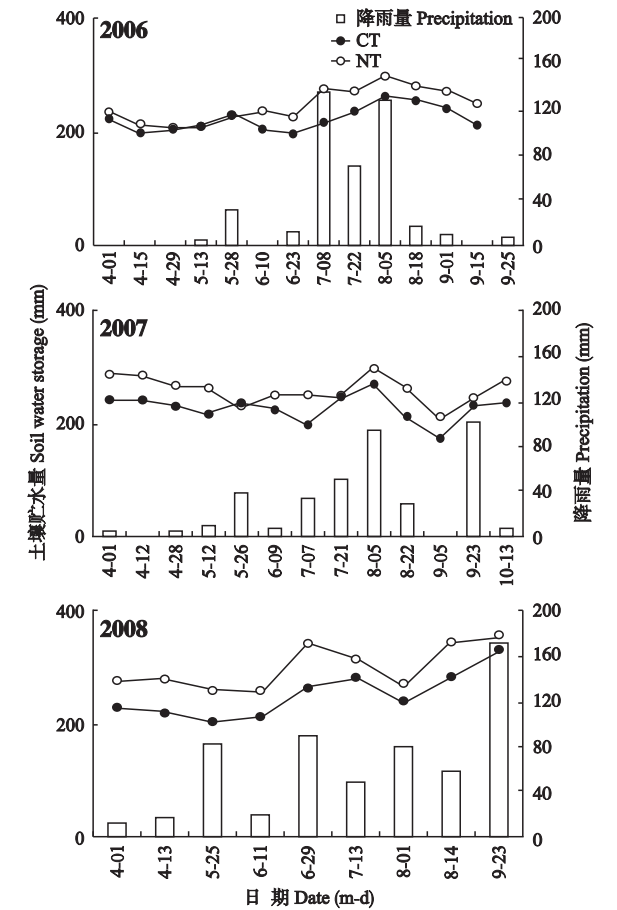


图1 0~100 cm 土层的土壤贮水量随玉米生长时间及降水的变化

Fig.1 Change of soil water storage within 0~100 cm soil layer with crop growing and precipitation.

NT: 免耕 No-tillage; CT: 翻耕 Conventional tillage. 下同 The same below.

业土壤最理想的三相比(2:1:1)(表1);免耕土壤水稳性团聚体的数量均明显大于传统翻耕,粒径0.25~0.5、0.5~1、1~2以及>2 mm的土壤水稳性团聚体含量分别是翻耕的3.0、7.2、4.8和7.5倍

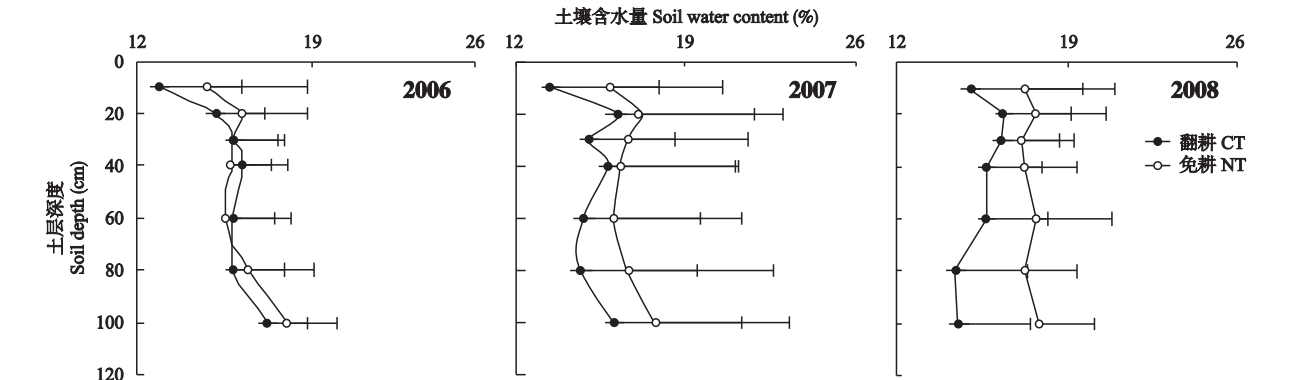


图2 免耕和翻耕条件下作物全生育期各土层的平均含水量

Fig.2 Soil water content during growing seasons in the no-tillage and conventional tillage treatments.

表1 免耕和翻耕条件下土壤的容重、孔隙度和三相组成

Table 1 Soil bulk density, porosity and the ratio of soil particle, water and air in the no-tillage and conventional tillage treatments

耕作方式 Tillage pattern	容重 Bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity (%)	固相率 Ratio of soil particle (%)	液相率 Ratio of soil water (%)	气相率 Ratio of soil air (%)
NT	1.3	50.1	49.9	25.7	24.4
CT	1.4	48.7	51.3	23.7	25.0

NT: 免耕 No-tillage; CT: 翻耕 Conventional tillage. 下同 The same below.

表2 免耕和翻耕条件下土壤>0.25 mm 团聚体含量

Table 2 Content of soil water stable aggregate (>0.25 mm) in the no-tillage and conventional tillage treatments (%)

耕作方式 Tillage pattern	0.25 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 1 mm	1 ~ 2 mm	>2 mm
NT	0.87	0.79	0.29	0.30
CT	0.29	0.11	0.06	0.04

(表2),由于土壤中>0.25 mm 的水稳性团聚体含量是影响土壤团聚特征和稳定性的主要因子,土壤中>0.25 mm 的团聚体越多,团聚体的水稳性越大,团聚体的破坏率越低^[11],故免耕土壤团聚体的水稳性较好.上述土壤物理特性的改善均有利于增加土壤的保水性能.由于土壤水分状况受降水量、作物吸收和蒸发、蒸腾等因素的综合影响,免耕较翻耕土壤水分的增量在不同时期的差异较大,其增幅(2.7%~30.3%)表现出较大的波动范围.

2.2 北方旱作玉米地土壤含水量的剖面分异

不同耕作方式对土壤含水量及其剖面分异均有较大影响(图2).研究区免耕土壤全剖面(0~100 cm)的平均含水量分别较传统翻耕高3.4%(2006年)、10.0%(2007年)、12.8%(2008年),且各土层的土壤含水量均普遍高于对应的翻耕土层,其中

0~10 cm 和 80~100 cm 的土壤水分增量明显高于中间土层. 2006、2007 年, 与翻耕地相比, 免耕地 0~10 cm 土层的水分增幅最大, 增幅分别为 15.3% 和 18.3%; 受降雨量增大的影响, 2008 年土壤的总体含水量较 2006、2007 年有所增加, 与翻耕地相比, 免耕地 60~80 cm 和 80~100 cm 土层的水分增幅较大, 分别为 22.2% 和 19.9%, 0~10 cm 土层的增幅达 14.4%. 免耕减少了对土层的扰动, 有利于抑制土面的无效蒸发, 提高表层水分含量, 而在降水比较充分的条件下又有利于保持土壤的深层蓄水, 从而提高水分利用率.

2.3 北方旱作玉米地作物不同生长阶段的土壤含水量特征

根据春玉米不同生长阶段的需水特性以及降水等气候条件的差异, 将其生育期划分成 3 个阶段, 即生长前期(4 月至 5 月上旬)、生长中期(5 月中旬至 8 月底)和生长后期(9 月). 其中, 生长中期的降雨量(图 3)及作物需水量最大.

2006 年春玉米生长前期的降雨量较低, 由于该期干旱少雨, 两种耕作方式下全剖面的土壤含水量

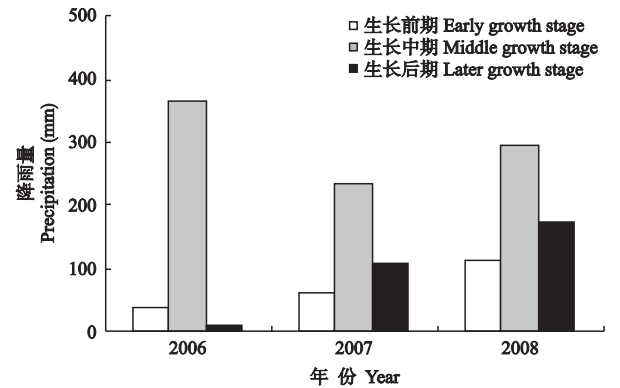


图 3 春玉米不同生长阶段的降雨量
Fig. 3 Precipitation in different growth stages of spring corn from 2006 to 2008.

均无显著差异; 2007、2008 年的同期降雨量有所增加, 分别是 2006 年同期降雨量的 1.6 和 2.8 倍, 受降雨量增大的影响, 2007、2008 年免耕地土壤全剖面的平均含水量均显著高于翻耕地, 且表层(0~10 cm)的差异显著, 说明免耕覆盖可有效抑制土壤表层的水分蒸发、增加土壤的保水能力, 其贮水量在降雨相对充分的条件下有所提高. 春玉米生长中期, 降

表 3 免耕和翻耕条件下土壤平均含水量随作物生长期的变化
Table 3 Variation of soil water content with growth stage in the no-tillage and conventional tillage treatments (%)

生长阶段 Growth stage	土层深度 Soil depth (cm)	2006		2007		2008	
		CT	NT	CT	NT	CT	NT
生长前期 Early growth stage	0~10	10.8ab	12.5a	12.2b	14.8a	12.9b	16.5a
	10~20	14.2a	15.0a	14.5ab	15.9a	15.5ab	16.7a
	20~30	14.9a	14.8a	14.3ab	15.1a	15.1ab	16.6a
	30~40	16.2ab	14.5a	14.8a	14.9a	15.0ab	16.4a
	40~60	15.4a	13.5ab	13.9ab	14.5a	13.8ab	15.4a
	60~80	14.8a	14.7a	14.0ab	15.8a	11.5b	15.3a
	80~100	16.9a	16.9a	15.5ab	17.5a	12.0b	16.1a
生长中期 Middle growth stage	0~100	14.7a	14.6a	14.2b	15.5a	13.7b	16.1a
	0~10	13.9b	16.5a	13.1b	15.9a	15.2ab	16.7a
	10~20	15.7ab	17.4a	16.6ab	17.8a	16.2a	17.2a
	20~30	16.7a	16.8a	14.6b	17.2a	16.3a	16.9a
	30~40	16.5ab	17.1a	16.5a	17.0a	15.6ab	17.2a
	40~60	16.1ab	17.2a	15.5a	17.3a	15.8ab	18.7a
	60~80	16.5ab	18.3a	16.1a	18.3a	15.2b	17.9a
生长后期 Later growth stage	80~100	17.5ab	19.3a	17.4a	19.0a	15.1b	18.2a
	0~100	16.1ab	17.5a	15.7b	17.5a	15.6b	17.5a
	0~10	14.9a	15.6a	17.4a	17.8a	20.6a	21.2a
	10~20	16.4a	16.5a	18.3a	17.7a	19.9a	21.1a
	20~30	16.2a	16.2a	17.8a	17.9a	19.8a	19.5a
	30~40	16.6a	15.9a	15.5b	17.3a	18.7ab	19.6a
	40~60	16.6a	15.9a	14.3ab	15.4a	20.1a	19.6a
	60~80	17.4a	16.7a	11.4ab	12.8a	19.6a	20.1a
	80~100	18.5a	18.1a	12.5ab	14.0a	19.3a	20.1a
	0~100	16.7a	16.4a	15.3a	16.1a	19.7a	20.2a

表中不同小写字母表示相同年份相同土层不同处理间的含水量差异显著 ($P<0.05$) Different small letters meant significant difference at 0.05 level between the no-tillage and conventional tillage treatments in the same year and the same soil layer.

雨量较大,免耕地较翻耕地的土壤水分增量普遍高于其他时期,由于该期植株生长旺盛,此时土壤含水量的增加可大大提高水分利用效率。春玉米生长后期,随着降雨量的降低以及作物的成熟,不同耕作方式下地表覆盖度逐渐趋于一致,此时,作物的吸收、蒸腾和地表蒸发作用的差异逐渐减小,免耕地的土壤贮水量在此阶段有所降低,较翻耕地无显著差异(表3)。

在降雨相同且无外源灌水的条件下,2008年免耕和翻耕耕作方式所获玉米经济产量分别为13765.7和11828.2 kg·hm⁻²,与此对应的春玉米籽实的水分利用效率分别为32.6和28.8 kg·hm⁻²·mm⁻¹,表明免耕地增加土壤保水能力的同时,其水分利用效率也明显增大。

3 讨 论

不同耕作方式对土壤水分含量具有较大影响。大量研究证实,免耕具有显著的水土保持效应和作物增产效应,但对土壤含水量的影响程度会因地区、年份以及季节降雨量的不同而有所差异^[12]。Singh等^[13]研究结果表明,免耕覆盖、耕作覆盖、传统耕作下,雨季的土壤平均含水量比干季高5%~6%,3种处理的差异在干季时更大。许迪等^[14]研究降水和灌溉对土壤水分的影响发现,正常和干旱年份免耕土壤平均含水量较传统翻耕分别增加7.1%和15.4%。本研究中免耕地土壤贮水量在不同时刻以及不同降雨条件下均高于翻耕,增幅为翻耕土壤的2.7%~30.3%,两者的差异在降水较大情况下表现突出。2008年降雨量较高,本研究区作物全生育期的免耕土壤贮水量高于翻耕,平均增量为19.9%,最高达30.3%;2006、2007年降雨量较低,其平均增量分别为10.8%、13.9%;就作物不同生长期的水分差异来看,春玉米生长中期的降雨量较大,免耕和翻耕地土壤含水量的差异在该生长期均达显著水平,生长后期的降雨量较小,免耕和翻耕地土壤含水量的差异不显著。上述研究结果表明,当地的免耕耕作措施有利于提高土壤的蓄水保墒作用,其贮水量随降雨量的增加而增大,这对于提高我国北方地区有限降雨资源的作物利用率具有积极意义。

免耕处理下,春玉米全生育期土壤剖面的平均含水量均明显高于传统翻耕,两者间的差异在降水较大情况下表现突出,其中表土层(0~10 cm)和底土层(80~100 cm)的水分增量明显高于中间层次,最高增量可达翻耕土壤的22.2%。Singh等^[13]认为,

免耕覆盖15 cm深的土壤含水量最大,与传统耕作的差异也最大,65 cm以下深的土壤含水量间的差异有所减小,一般小于2%。Doran等^[15]研究结果显示,免耕地表层(0~7.6 cm)土壤含水量比传统耕作高9.7%,而7.6~15.2 cm土层的增幅为6.9%。李玲玲等^[4]研究表明,免耕覆盖对表层(0~10 cm)土壤水分含量影响较大。表层土壤含水量的增加与免耕覆盖减少对土层的扰动、增加土壤有机质、抑制无效蒸发有关。中间土层的水分消耗主要与春玉米的根系分布有关。春玉米根系主要分布在0~60 cm土层,是作物吸收水肥的主要活动层次,而60~100 cm土层的根系量仅占根系总量的3.8%~6.0%^[16]。此外,免耕有利于降低表土容重,增加并保护土壤微孔隙及其连续的孔隙路径,对土壤水力学性质有较大影响,可增加土壤水分入渗量,提高土壤深层蓄水^[17-18]。本研究中免耕地80~100 cm土层的土壤水分增量明显高于中间层次和翻耕地相应土层,而底层蓄集的水分可沿土壤毛管孔隙上升至作物根层,从而增强了农田的蓄水及持续供水能力。基于其显著的水分效应,免耕覆盖是适于我国北方旱作农业的优良耕作方式。

大量研究表明,免耕覆盖有利于改善土壤物理性状、降低土壤容重、提高土壤孔隙度及液相所占的比例、促进土壤水稳性团聚体的形成,在增加农田保水能力的同时也提高了作物的水分利用效率,进而增加作物产量,其水土保持效应及作物增产效应随免耕年限的增长而增加^[19-21]。本研究中,免耕3年的土壤物理性质与翻耕土壤无显著差异,但免耕土壤的三相比更趋近于农业土壤最理想的三相比(2:1:1),土壤水稳性团聚体的数量也表现出了明显的增加趋势,水分利用率和春玉米产量分别较传统翻耕提高了13.3%和16.4%,表明该耕作方式在北京地区的推广应用具有重要的生态和生产效应。

参考文献

- [1] Zhai Y-P (翟亚萍), Tang X-P (唐小平). A study on the problem of protective cultivation in the north of China. *Journal of Xi'an Shiyong University (Social Sciences)* (西安石油大学学报·社会科学版), 2008, **17**(3): 36-39 (in Chinese)
- [2] Wang X-B (王小彬), Cai D-X (蔡典雄), Jin K (金轲), et al. Water availability for winter wheat affected by summer fallow tillage practices in sloping dryland. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2003, **36**(9): 1044-1049 (in Chinese)
- [3] Du J-T (杜建涛), He W-Q (何文清), Nangia V, et

- al.* Effects of conservation tillage on soil water content in northern arid regions of China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2008, **24**(11): 25–29 (in Chinese)
- [4] Li L-L (李玲玲), Huang G-B (黄高宝), Zhang R-Z (张仁陟), *et al.* Effects of conservation tillage on soil water regimes in rainfed areas. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(9): 2326–2332 (in Chinese)
- [5] Zhang X-P (张晓平), Fang H-J (方华军), Yang X-M (杨学明), *et al.* Effects of no-tillage practices on temperature and moisture of a black soil in the spring and early summer. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2005, **36**(3): 313–316 (in Chinese)
- [6] Lü J-J (吕军杰), Yao Y-Q (姚宇卿), Wang Y-H (王育红), *et al.* Effects of soil tillages on soil moisture in slop land. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2003, **34**(1): 74–76 (in Chinese)
- [7] Jin Y-Z (金亚征), Xie R-Z (谢瑞芝), Feng J-K (冯聚凯), *et al.* Research on the effect of summer maize yield under conservation tillage pattern in North China Plain. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2008, **16**(4): 143–146 (in Chinese)
- [8] Wu F-L (伍芬琳), Zhang H-L (张海林), Li L (李琳), *et al.* Characteristics of CH₄ emission and greenhouse effects in double paddy soil with conservation tillage. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2008, **41**(9): 2703–2709 (in Chinese)
- [9] Huang C-Y (黄昌勇). *Soil Science*. Beijing: China Agriculture Press, 2002 (in Chinese)
- [10] Hou X-Q (侯贤清), Han Q-F (韩清芳), Jia Z-K (贾志宽), *et al.* Effects of different tillage practices in summer fallow period on soil water and crop water use efficiency in semi-arid areas. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2009, **27**(5): 52–58 (in Chinese)
- [11] Liu X-L (刘晓利), He Y-Q (何园球), Li C-L (李成亮), *et al.* Distribution and physical properties of soil water-stable aggregates in different red soils in land use and soil fertility. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(3): 459–465 (in Chinese)
- [12] Peng W-Y (彭文英). Effect of no-tillage on soil water regime and water use efficiency. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2007, **38**(2): 379–383 (in Chinese)
- [13] Singh B, Chanasysk DS, McGill WB. Soil water regime under barley with long-term tillage-residue systems. *Soil & Tillage Research*, 1998, **45**: 59–74
- [14] Xu D (许迪), Schmid R, Mermoud A. Effects of tillage practices on the variation of soil moisture and the yield of summer maize. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 1999, **15**(3): 107–112 (in Chinese)
- [15] Doran JW, Elliott ET, Paustian K. Soil microbial activity, nitrogen cycling, and long-term change in organic carbon pools as related to fallow tillage management. *Soil & Tillage Research*, 1998, **49**: 3–18
- [16] Lu H-D (路海东), Xue J-Q (薛吉全), Ma G-S (马国胜), *et al.* Soil physical and chemical properties and root distribution in high yielding spring maize fields in Yulin, Shanxi Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(4): 895–900 (in Chinese)
- [17] Azooz RH, Arshad MA. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. *Canadian Journal of Soil Science*, 1996, **76**: 143–152
- [18] Strudley MW, Green TR, Ascough II JC. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil & Tillage Research*, 2008, **99**: 4–48
- [19] So HB, Grabski A, Desborough P. The impact of 14 years of conventional and no-till cultivation on the physical properties and crop yields of a loam soil at Grafton NSW, Australia. *Soil & Tillage Research*, 2009, **104**: 180–184
- [20] Cavalieri KMV, Silva AP, Tormena CA, *et al.* Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. *Soil & Tillage Research*, 2009, **103**: 158–164
- [21] Moussa-Machraoui SB, Errouissi F, Ben-Hammouda M, *et al.* Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. *Soil & Tillage Research*, 2010, **106**: 247–253

作者简介 余海英,女,1980年生.主要从事土壤与环境研究. E-mail: haiyingaa1@163.com

责任编辑 杨弘
