

# 地膜覆盖栽培玉米根系形态对施氮量的响应

宋启龙<sup>1</sup>, 岳善超<sup>2</sup>, 蔡立群<sup>1,2</sup>

(1.甘肃农业大学 资源与环境学院, 兰州 730070; 2.西北农林科技大学  
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为研究覆膜条件下氮肥用量对根系生长的影响,于 2017 年和 2018 年分别设置包括不施氮(N<sub>0</sub>)、适量施氮(N<sub>250</sub>)和过量施氮(N<sub>380</sub>)3 个处理的田间试验,以先玉 335 为供试玉米品种,分别在拔节期和开花期采用 3D Monolith (三维空间立体分析)取样法获得根系后,用 WinRHIZO Pro 软件分析根系的各项指标数据,评价不同氮肥用量根系生长情况。结果表明:覆膜条件下氮肥用量对根系的影响主要在上层土壤,适量施氮上层土壤中有更加发达的根系,表现为拥有更多的细根,适量施氮会显著增加玉米总根干重、根长、根表面积和根体积,增加幅度达 86.1%,35.22%,62.2%,113.1%,而过量氮肥投入虽然在开花期对深层土壤中根系略有促进,但总量上仍然表现出抑制作用,过量施氮对玉米总根干重、根长、根表面积和根体积的降低幅度分别达 18.4%,20.6%,18.6%和 19.6%,均达显著水平。综合各指标表明,250 kg/hm<sup>2</sup>是覆膜条件下适宜根系生长的氮肥施用量,过高氮肥投入在造成资源浪费的同时会显著抑制根系生长。

**关键词:**覆膜; 氮肥施用; 玉米根系

中图分类号:S513; S143.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0023-07

## Response of Maize Root Morphology to Nitrogen Application Under Film Mulch

SONG Qilong<sup>1</sup>, YUE Shanchao<sup>2</sup>, Cai Liqun<sup>1,2</sup>

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural  
University, Lanzhou 730070, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland  
Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to study the effect of nitrogen application rate on root growth under film mulch conditions, field trials including no application of nitrogen, appropriate nitrogen application and excessive nitrogen application were carried out. The tested maize variety was Xianyu 335. The root system was obtained by 3D Monolith sampling method. The root index data were obtained by WinRHIZO Pro software analysis. The root growths under different nitrogen fertilizer rates were evaluated. The results showed that the main effect of nitrogen application rate on the root system under the mulch condition was found in the upper layer soil; there was a more developed root system in the upper layer with application of nitrogen, there were more fine roots, and the appropriate amount of nitrogen fertilizer significantly increased the dry weight of the total root, root length, root surface area and root volume of the corn, the increment rates were 86.1%, 35.22%, 62.2% and 113.1%, respectively, while the excess nitrogen fertilizer increased in the root slightly during the flowering stage, but still showed the inhibition on roots, the reduction rates of root dry weight, root length, root surface area and root volume of corn were 18.4%, 20.6%, 18.6% and 19.6%, respectively. The study suggests that the nitrogen fertilizer application rate 250 kg/hm<sup>2</sup> is suitable for root growth under film mulching condition. Excessive high nitrogen fertilizer input can significantly inhibit root growth and waste resources.

**Keywords:** film mulch; nitrogen application; maize root

根系是作物对环境资源截获利用的最重要器官,其形态及在土壤中的空间分布显著影响水分和养分

吸收,在养分、水分吸收利用中起关键作用<sup>[1]</sup>。根系空间分布、根长、根系表面积及根重等性状,可以较好

地表征根系对水分和养分的吸收与利用。作物根系形态建成是基因表达与外界环境因素综合作用下的结果,由于根系对土壤环境的适应具有可塑性<sup>[2]</sup>,因此作物可通过根构型变化来调节对土壤养分和水分的吸收能力,从而适应生长环境变化。由于地膜覆盖能够极大地改善土壤水热状况,促进玉米生长,是提高玉米产量和农田降水利用效率的有效途径<sup>[3]</sup>,因而在黄土高原地区雨养玉米种植中得到了广泛的推广和应用。地膜覆盖在提高玉米产量和水分利用效率的同时,会对玉米的根系生长发育产生怎样的影响?目前研究结论缺乏一致性<sup>[4-5]</sup>。

氮素作为影响植物生长发育和产量形成的主要因素<sup>[6]</sup>,氮肥用量不仅会影响地上部的生长发育,也会对根系形态建成和氮素吸收利用产生影响<sup>[7]</sup>。有研究表明,低浓度硝酸盐会促进根系伸长,而高浓度硝酸盐则会产生抑制作用,适当低氮处理还能够刺激侧根生长<sup>[8]</sup>。在雾培条件下,适当低氮可以增加侧根数、侧根总长度、单位轴根的侧根长度,但根毛密度下降<sup>[9]</sup>。根系生长对不同氮素供应水平反应不同,前人对玉米根系与氮肥施用量之间的关系进行了大量研究<sup>[10]</sup>,然而,在黄土高原旱地雨养农业区覆膜种植条件下关于玉米根系形态与施氮量之间关系的研究报道较少。本研究通过田间试验,在大田尺度下评价覆膜栽培早作春玉米根系生长特性和形态分布对施氮量的响应,旨在为本地区玉米根系生长及调控提供理论依据。

## 1 材料方法

### 1.1 试验区概况

试验位于黄土高原中南部陕甘交界处的陕西省长武县洪家镇王东村,北纬 35°12',东径 107°40',海拔 1 200 m。属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水 584 mm,年均气温 9.1℃,无霜期 171 d,地下水埋深 50~80 m,属典型的旱作农业区;地貌属高原沟壑区,塬面和沟壑两大地貌单元各占 35%,65%,地带性土壤为黑垆土,质地均匀疏松。两年试验的生育期降雨和气温如图 1 所示。

### 1.2 试验设计

分别于 2017 年和 2018 年设置包括不施氮(N<sub>0</sub>对照),适量施氮 250 kg/hm<sup>2</sup>(N<sub>250</sub>),过量施氮 380 kg/hm<sup>2</sup>(N<sub>380</sub>) 3 个处理的田间试验,各处理重复 3 次,采用随机区组排列(两年试验同一小区施氮量固定)小区面积为 56 m<sup>2</sup>。氮肥分 3 次施入,其中 40%氮肥和磷钾肥一起作为基肥一次性于播种前均匀撒施地表,然后翻耕;拔节期追肥 30%,抽雄期追肥 30%,两次追肥均采用点施法追肥。磷肥采用过磷酸

钙,施纯磷 40 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥采用硫酸钾,施纯钾 80 kg/hm<sup>2</sup>。供试玉米品种为先玉 335。两年试验采用全膜双垄沟种植,即大垄宽 60 cm,高 10 cm,小垄宽 40 cm,高 15 cm,株距 25 cm,周年覆膜,种植密度为 80 000 株/hm<sup>2</sup>,每年 4 月下旬播种,9 月下旬收获。

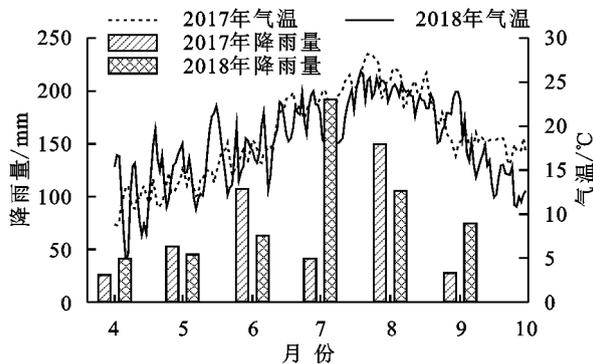


图 1 试区生育期内降水和气温

### 1.3 测定指标与方法

采用 3D Monolith(三维空间立体分析)法采取玉米根系,以便准确反映田间实际生长情况<sup>[11]</sup>。分别于拔节期和开花期各处理随机选取长势均匀并且位置连续(种植行方向)的 2 株玉米挖取根系,对各处理 3 个重复进行取样。取样土体总长 50 cm,宽 50 cm,深度 100 cm。0—40 cm 每 10 cm 一层,40—100 cm 每 20 cm 一层,共分为 7 层,每层 4×5=20 个土块进行分块取样,土样取出后挑选每个土块所含的所有根系,用清水冲洗后用扫描仪器(EPSON V800)扫描获得根系图片文件,图片文件用专业根系分析软件(WinRHIZO Pro Vision 5.0)分析获得根系各指标数据,80℃烘至恒重获得各土块根系生物量。

### 1.4 数据处理

试验数据用 Excel 2003,SPSS 18.0 软件进行统计分析,用 Origin 9.1 进行绘图。

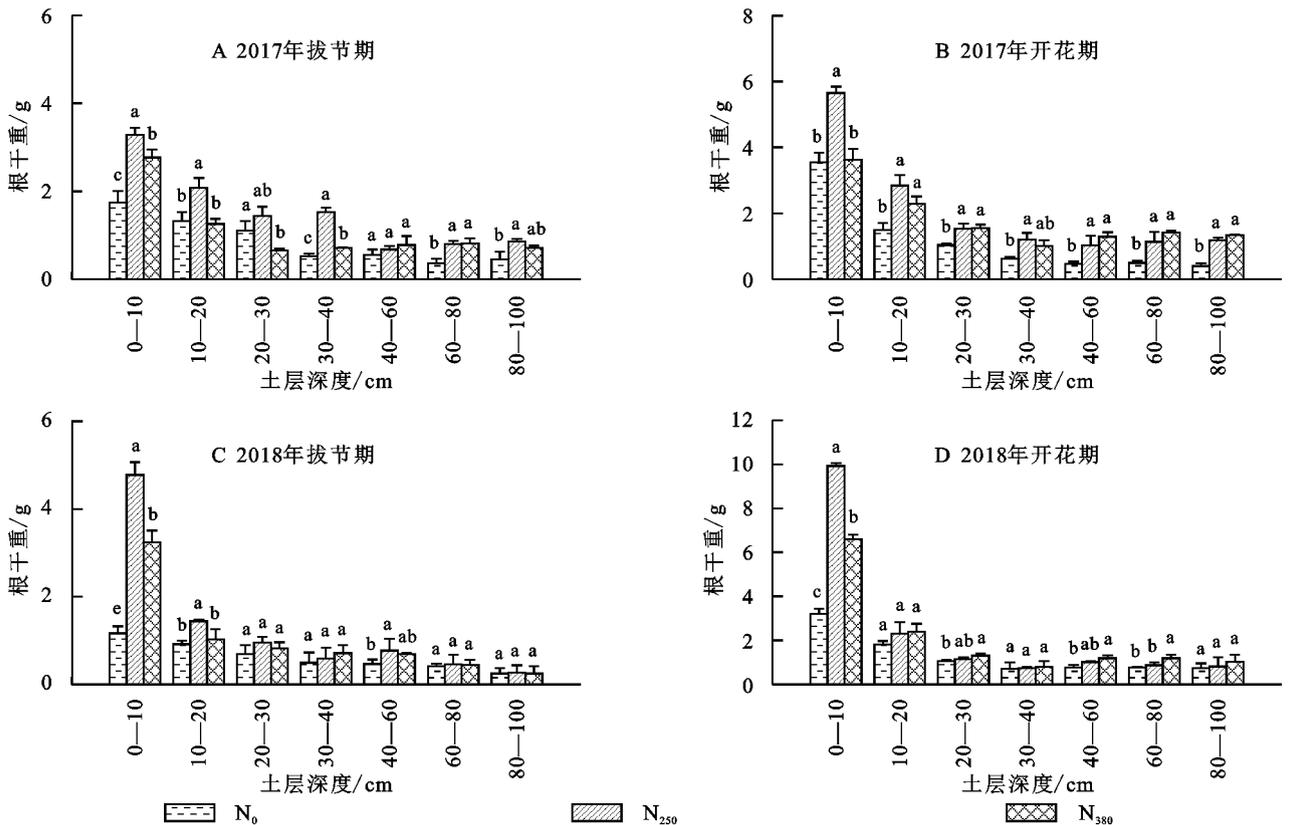
## 2 结果与分析

### 2.1 不同施氮水平对根系干重的影响

两年不同处理根系干重剖面分布见图 2。覆膜玉米根系干重随土层加深呈现递减的变化趋势,表层根系占根系干重的绝大部分,其中 N<sub>0</sub>,N<sub>250</sub>,N<sub>380</sub> 处理拔节期耕层(0—20 cm)根重占比两年均值分别为 49.3%,58.2%,55.7%,开花期可达 58.9%,66.1%,55.2%,N<sub>250</sub> 处理耕层根重占比最大。与 N<sub>0</sub> 相比,N<sub>250</sub> 在拔节期各土层根干重总体上表现出增加趋势,N<sub>380</sub> 处理和 N<sub>250</sub> 处理相比,整体上表现减少趋势,各处理间差异主要表现在表层。2 a 平均结果表明,相比于 N<sub>0</sub>,N<sub>250</sub> 在每个土层根干重全部显著增加,拔节期增加增幅为 33.3%~177.1%,开花期为 28.4%~130.1%。相比于 N<sub>250</sub>,N<sub>380</sub> 在拔节期在 0—40 cm 各

土层和 80—100 cm 土层表现出根干重的显著降低,降低幅度在 14.5%~38.2%,在开花期在 0—10 cm 土层显著降低 34.4%,但是在 40—100 cm 各土层升高 18.7%~30.1%。过量施氮在拔节期显著降低表层和深层土壤根干重,然而在开花期过量施氮显著降低表层根重、增加了深层根重,说明过量施氮对根干重的影响在不同生育期有所差异。从年份和生育期

平均看,与  $N_0$  相比, $N_{250}$  处理会显著增加各土层根干重,增加幅度为 30.7%~144.9%,而与  $N_{250}$  相比, $N_{380}$  处理对于 0—40 cm 各土层根干重明显降低 14.5%~31.4%,而 40—100 cm 土层根干重增加 6.7%~18.4%。表明适量施氮会显著促进各个生育期各土层根干重,过量施氮导致 0—40 cm 土层根干重显著下降,40—100 cm 土层有所升高。



注:不同字母表示品种间差异达 5% 显著水平,下同。

图 2 2017 年、2018 年不同氮肥水平下不同土层拔节期、开花期根系干重

对于 0—100 cm 土壤剖面根系总干重,3 个氮肥水平之间,拔节期和开花期根总干重差异在 2017 年和 2018 年均达到显著水平(表 1)。与  $N_0$  处理根系总干重相比,适宜施氮( $N_{250}$ )拔节期和开花期根系总干重在 2017 年分别增加 75.7%,90.3%,在 2018 年分别增加 110.9%,63.6%,适度施氮表现出对根重的促进作用。与  $N_{250}$  相比, $N_{380}$  处理拔节期和开花期根系总干重在 2017 年分别减少 27.8%,14.1%,在 2018 年分别减少 22.4%,13.9%。综合 2 a 试验结果,适量施氮显著提高了 0—100 cm 土壤剖面总根重,相较于适量施氮,过量施氮总根重显著降低。

## 2.2 不同施氮水平对根长的影响

施氮显著影响总根长,影响程度与总根重类似(表 1), $N_{250}$  处理会显著促进 0—100 cm 土壤剖面总根长,与  $N_0$  相比, $N_{250}$  处理拔节期和开花期总根长在 2017 年增加 39.7%,70.7%,2018 年增加 27.4%,20.2%,增

加幅度显著,表明适度施氮表现出对根长的显著促进作用,与  $N_{250}$  处理相比, $N_{380}$  处理拔节期和开花期总根长在 2017 年减少 35.7%,17.7%,2018 年减少 31.9%,5.3%,说明过量施氮会抑制根系生长。平均年份和生育期,相较于  $N_0$ , $N_{250}$  根长增加 35.22%,相较于  $N_{250}$ , $N_{380}$  根长降低 20.6%,适量施氮显著提高了 0—100 cm 土壤剖面总根长,相较于适量施氮,过量施氮总根长显著降低。根系长度主要来源于直径  $\leq 0.5$  mm 的根系,拔节期和开花期直径  $\leq 0.5$  mm 根系占总根长的 70% 以上;直径在 0.5~1 mm 的根长占总根长的比例不到 20%;直径在 1~2 mm 的根长对总根长的贡献不足 10%; $\geq 2$  mm 的根长最少,占比在 2% 以下。

由图 3 可见,根长呈现出随土层深度增加而减小的趋势。和  $N_0$  相比, $N_{250}$  处理根长总体上表现出增加趋势, $N_{380}$  处理与  $N_{250}$  处理相比,整体上表现减少

趋势,各处理间的差异主要表现在耕层。平均两年试验结果, $N_0$ 、 $N_{250}$ 、 $N_{380}$ 处理拔节期在耕层(0—20 cm)根长所占比例达 47.7%、51.0%、47.5%;开花期可达 50.3%、58.5%、47.4%。从两年试验结果平均看,相比于  $N_0$ ,除 30—30 cm 土层外, $N_{250}$ 在拔节期和开花期每个根长全部显著增加,拔节期增加 8.0%~67.0%,开花期增加 12.3%~88.1%。相比于  $N_{250}$ 、 $N_{380}$ 在 0—100 cm 剖面各土层根长显著降低 17.8%~43.47%,开花期在 0—20 cm 各土层显著降低 18.2%~31.2%,但在 40—80 cm 各土层显著升高 25.26%~27.75%,其余土层未表现出显著差异,过量施氮在拔节期显著降

低每个土层根长,然而在开花期过量施氮显著降低 0—20 cm 根长、增加了 40—80 cm 根长,表明过量施氮对根长的影响在不同生育期有所差异。从不同年份和生育期平均看,相比于  $N_0$ 、 $N_{250}$ 处理除 20—30 cm 土层根长减少 12.8%外,其余土层均会显著增加,增加幅度为 12.9%~78.3%,相比于  $N_{250}$ 、 $N_{380}$ 过量施氮会减少根长,各土层减少幅度 0.8%~35.9%。表明适量施氮显著促进除 20—30 cm 土层外各个生育期每个土层根长,过量施氮导致 0—30 cm 土层根长显著降低 11.6%~35.9%,80—100 cm 土层根长降低 13.8%,其他土层根长无显著差异。

表 1 不同氮肥水平下土壤剖面 0—100 cm 根系特征参数

年份	生育期	处理	总根长/ 10 <sup>3</sup> cm	总根重/ g	总根表面积/ 10 <sup>3</sup> cm <sup>2</sup>	总根 体积/cm <sup>3</sup>	根长/10 <sup>3</sup> cm			
							$L \leq 0.5$ mm	$0.5 \text{ mm} < L \leq 1.0$ mm	$1.0 \text{ mm} < L \leq 2.0$ mm	$L \geq 2.0$ mm
2017	拔节期	$N_0$	13.4b	6.06c	1.67b	18.6c	10.7b	1.59c	1.00b	0.11b
		$N_{250}$	18.7a	10.64a	2.54a	31.6a	14.1a	2.61a	1.58a	0.36a
		$N_{380}$	12.0c	7.69b	1.75b	23.1b	8.6b	2.07b	1.12b	0.25a
	开花期	$N_0$	18.3c	7.65c	2.20c	20.7b	14.8c	2.26b	1.01b	0.19b
		$N_{250}$	31.2a	14.56a	4.07a	49.1a	24.4a	4.34a	1.81a	0.61a
		$N_{380}$	25.7b	11.93b	3.44b	43.4a	19.5b	4.17ab	1.60a	0.39ab
2018	拔节期	$N_0$	27.9b	6.26c	2.72b	22.4c	24.6ab	2.48c	0.75b	0.14b
		$N_{250}$	35.6a	13.21a	4.52a	51.1a	28.9a	4.54a	1.66a	0.51a
		$N_{380}$	24.2c	10.24b	3.44b	40.9b	18.9b	3.51b	1.34a	0.46a
	开花期	$N_0$	32.4b	9.03c	3.58c	30.0c	27.6a	3.30b	1.36b	0.15b
		$N_{250}$	39.0a	16.78a	5.34a	66.5a	30.7a	5.38a	2.27a	0.66a
		$N_{380}$	36.9a	14.45b	4.76b	52.1b	28.9a	5.24a	2.08a	0.64a

注:不同字母表示品种间差异达 5% 显著水平,  $L$  为根茎。

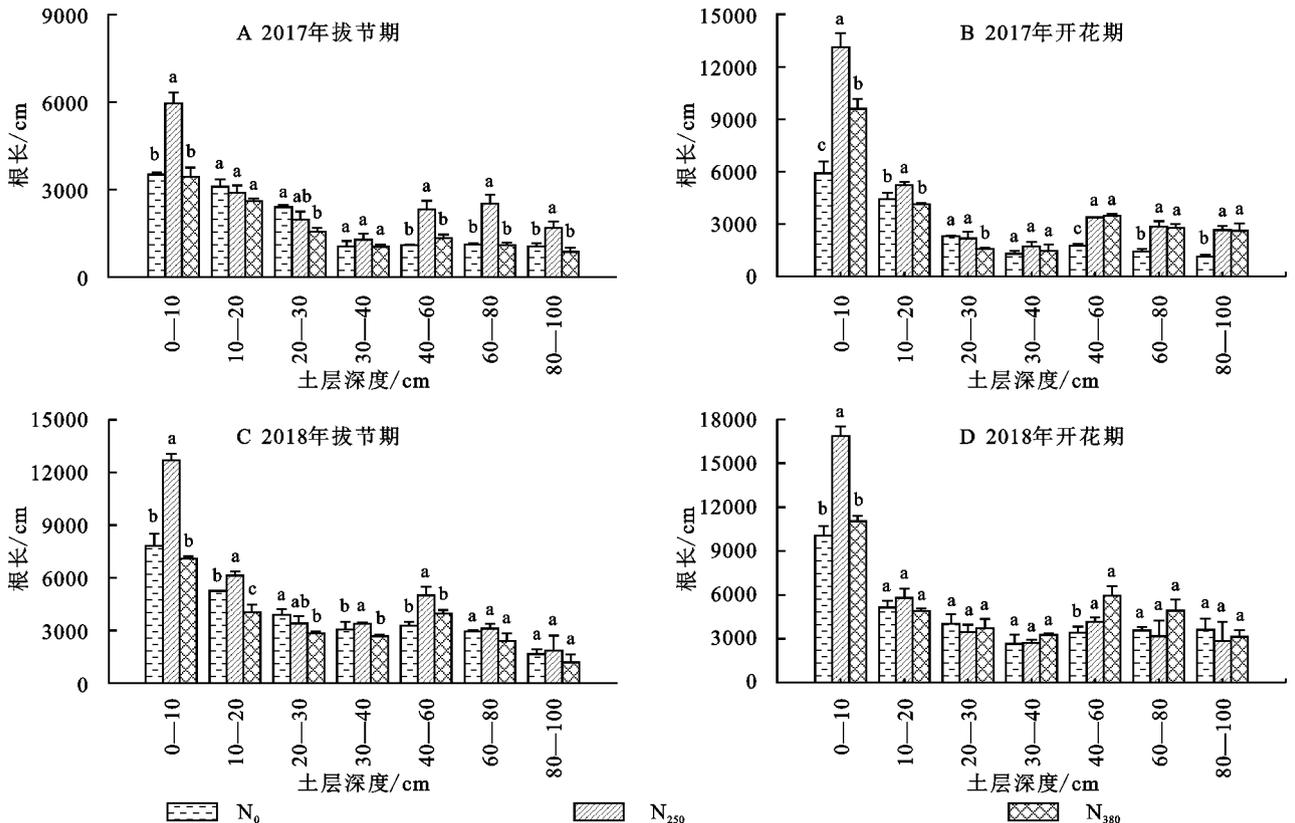


图 3 2017 年、2018 年不同氮肥水平下不同土层拔节期、开花期根长

### 2.3 不同施氮水平对根表面积的影响

施氮对总根表面积也会产生显著影响(表 1),  $N_{250}$  处理显著增加了拔节期和开花期 0—100 cm 土壤剖面总根表面积, 3 个氮肥水平在拔节期和开花期根表面积差异均达到显著水平, 表现出  $N_{250} > N_{380} > N_0$ , 与  $N_0$  相比,  $N_{250}$  拔节期和开花期在 2017 年增加 53.2%, 85.0%, 在 2018 年增加 66.2%, 49.2%, 适度施氮表现出对根表面积的显著促进作用, 与  $N_{250}$  相比,  $N_{380}$  处理拔节期和开花期在 2017 年减少 31.1%, 15.4%, 在 2018 年减少 23.9%, 10.7%, 过量施氮表现出对根表面积的显著抑制作用。平均年份和生育期, 相较于  $N_0$ ,  $N_{250}$  处理根表面积增加 62.2%, 相较于  $N_{250}$ ,  $N_{380}$  处理根表面积降低 18.6%, 适量施氮显著提高了 0—100 cm 土壤剖面总根表面积, 相较于适量施氮, 过量施氮总根表面积显著降低。

各处理根表面积随土层深度加深均呈现出递减趋势(图 4), 0—10 cm 土层均表现出  $N_{250} > N_{380} > N_0$ , 3 个氮肥处理之间差异达到显著,  $N_0$ ,  $N_{250}$ ,  $N_{380}$  在拔节期在耕层(0—20 cm)所占比例分别为 43.4%, 52.1%, 50.2%, 开花期在耕层占比分别达到 51.0%, 60.6%, 48.7%。和  $N_0$  相比,  $N_{250}$  处理根表面积总体上表现出增加趋势,  $N_{380}$  处理与  $N_{250}$  处理相比, 整体上表现为减少趋势, 各处理

间主要表现在表层的大幅差异, 相较于  $N_0$ ,  $N_{250}$  处理拔节期根系表面积在各个土层均有不同程度的增加, 增幅在 3.5%~159.5%, 相较于  $N_{250}$ ,  $N_{380}$  处理拔节期各个土层均有所降低, 降幅在 9.9%~52.8%, 平均两年试验, 相较于  $N_0$ ,  $N_{250}$  处理在拔节期和开花期每个土层根表面积均增加, 拔节期增加 3.5%~159.5%, 开花期增幅在 7.9%~142.6%。相较于  $N_{250}$ ,  $N_{380}$  处理在拔节期在 0—100 cm 剖面各土层根表面积均显著降低, 下降幅度 17.1%~38.7%, 在开花期在 0—20 cm 土层显著降低 10.2%~36.9%, 但是在 60—100 cm 各土层显著升高 10.3%~29.9%, 过量施氮在拔节期显著降低了各个土层的根表面积, 然而在开花期过量施氮显著降低 0—20 cm 根表面积, 增加了 60—100 cm 根表面积, 过量施氮对根表面积的影响在不同生育期存在差异(图 4)。平均年份和生育期, 相较于  $N_0$ ,  $N_{250}$  在各个土层根表面积均增加, 除 30—40 cm 土层增加不显著之外, 其余各土层根表面积显著增加 22.8%~148.5%, 相较于  $N_{250}$ ,  $N_{380}$  处理根表面积在 0—30 cm 土层显著减少 11.2%~35.1%, 80—100 cm 土层显著减少 9.5%, 其余各土层无显著差异, 这一结果与过量施氮对根长的影响一致。表明适量施氮会显著增加根表面积, 而过量施氮会导致 0—30 cm 土层根表面积显著降低。

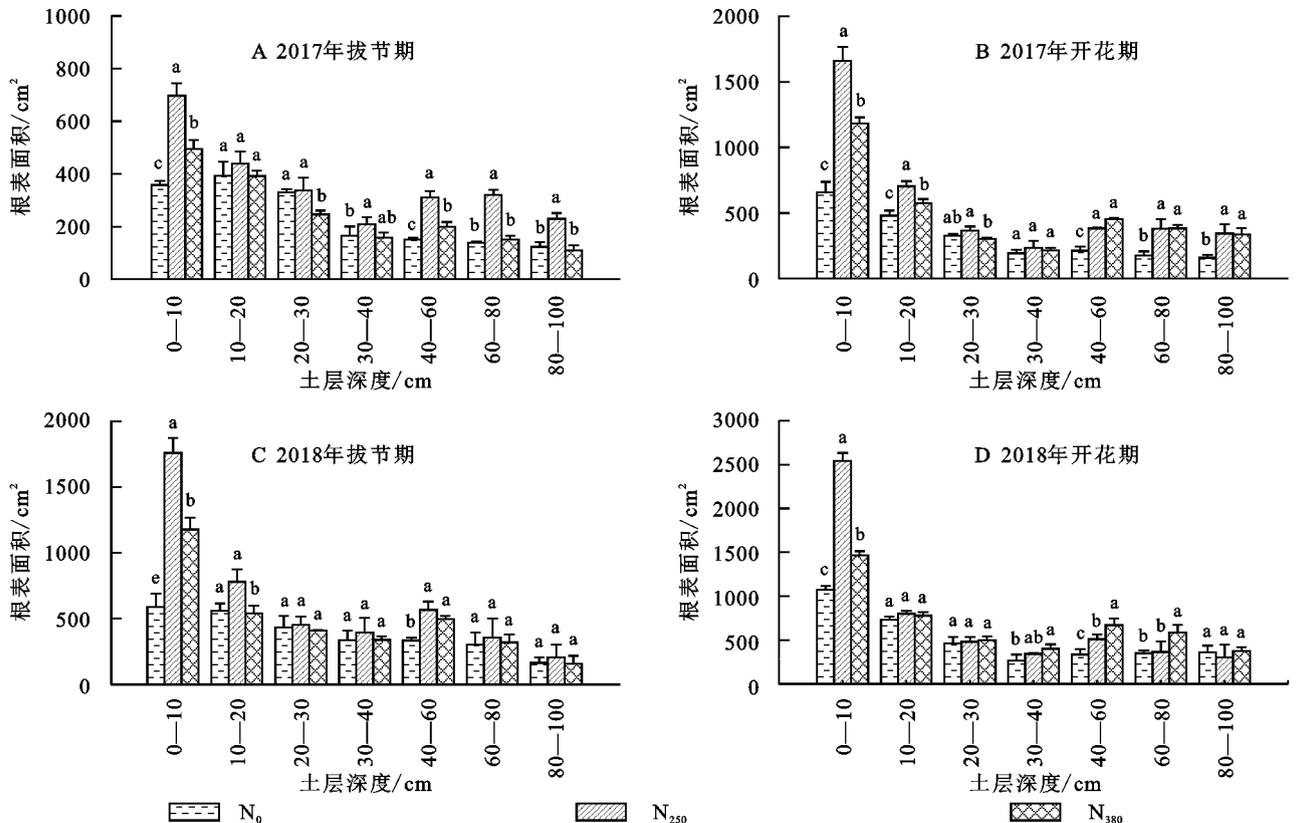


图 4 2017 年、2018 年不同氮肥水平下不同土层拔节期、开花期根表面积

### 2.4 不同施氮水平对根体积的影响

施氮显著影响总根体积(表 1),  $N_{250}$  处理会显著促进拔节期和开花期 0—100 cm 土层总根体积, 3 个

氮肥水平在拔节期和开花期均达到显著差异, 表现出  $N_{250} > N_{380} > N_0$ , 与  $N_0$  相比,  $N_{250}$  处理拔节期和开花期总根体积在 2017 年增加 71.9%, 120.0%, 2018 年

增加 128.3%, 121.9%, 证明适度施氮表现出对根体积的显著促进作用, 与  $N_{250}$  相比,  $N_{380}$  处理拔节期和开花期总根体积在 2017 年减少 26.9%, 11.6%, 在 2018 年减少 20.1%, 21.9%, 说明过量施氮对总根体积表现出显著的抑制效果。从年份和生育期平均看, 相较于  $N_0$ ,  $N_{250}$  处理总根体积增加 113.1%, 相较于  $N_{250}$ ,  $N_{380}$  处理总根体积降低 19.6%, 适量施氮显著提高了 0—100 cm 土壤剖面总根体积。

根体积在各土层之间的变化趋势与表面积基本保持一致, 均表现出随着各土层深度增加呈明显下降趋势(图 5), 从两年试验平均看,  $N_0$ ,  $N_{250}$ ,  $N_{380}$  处理 0—20 cm 土层根体积在拔节期分别占全土层的 41.3%, 56.5%, 54.9%; 开花期分别占 49.1%, 64.9%, 53.1%。相较于  $N_0$ ,  $N_{250}$  处理拔节期根系根体积在各个土层均有不同程度的增加, 增量在 22.5%~438.4%, 相较于  $N_{250}$ ,  $N_{380}$  处理拔节期各个土层根体积均有所降低, 降幅在

3.4%~56.4%, 但是开花期 2017 年 40—80 cm 各土层有略微增加, 其余土层减少 4.6%~22.5%, 总量上表现为减少 11.6%, 从两年试验结果平均看, 相比于  $N_0$ ,  $N_{250}$  处理在拔节期和开花期各土层根体积均显著增加, 拔节期增加 24.1%~286.6%, 开花期增幅 29.6%~295.8%。相比于  $N_{250}$ ,  $N_{380}$  处理拔节期在 0—100 cm 剖面各土层均表现出根体积的显著下降, 降低幅度为 15.3%~36.6%, 在开花期根体积在 0—20 cm 土层显著降低 9.0%~39.2%, 但在 60—100 cm 各土层显著增加 12.5%~31.2%, 这一结果与根表面积的变化保持一致。从年份和生育期平均看, 相比于  $N_0$ ,  $N_{250}$  处理会显著促进各土层根体积, 增加幅度达 26.9%~292.5%, 相比于  $N_{250}$ ,  $N_{380}$  过量施氮显著减少了表层 0—40 cm 各土层根体积 8.2%~34.2%, 其余土层差异并不显著, 表明适量施氮能够显著促进各个生育期每个土层根体积, 过量施氮导致 0—40 cm 土层根表面积显著降低。

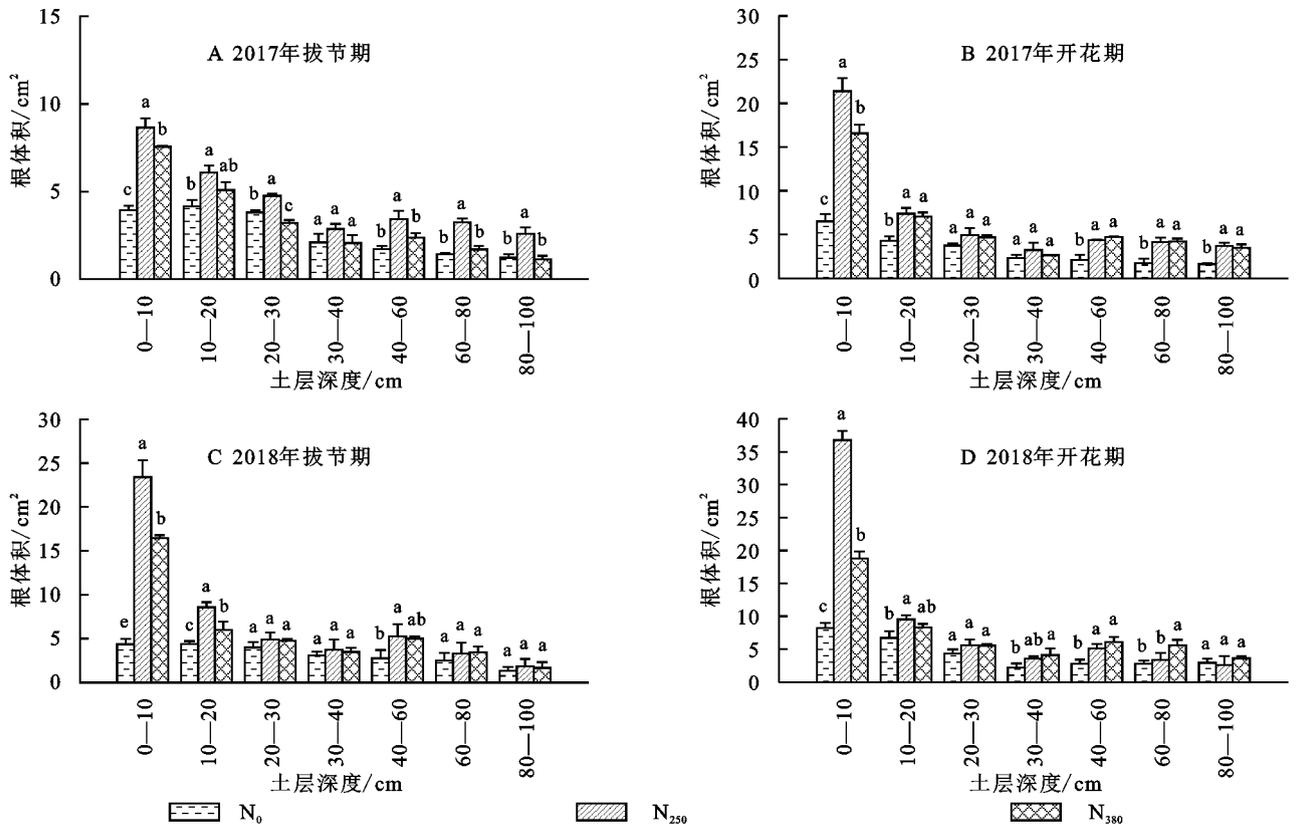


图 5 2017 年、2018 年不同氮肥水平下不同土层拔节期、开花期根体积

### 3 讨论

两年田间试验结果表明, 玉米根系生长与氮肥施用量密切相关, 适度施氮会显著提高 0—100 cm 剖面根长、根重、根表面积和根体积, 而过量施氮却表现出明显的抑制作用, 主要体现在对耕层土壤根系生长的影响。覆膜能够改善土壤水热状况, 对作物根系生长有着深刻影响<sup>[12]</sup>, 覆膜条件下更多的根系密集分布于浅层土壤<sup>[13]</sup>, 土壤表层根系贡献了大部分的根长,

是养分水分吸收的关键区域<sup>[14]</sup>。适量施氮条件下 ( $N_{250}$  处理), 在耕层会有更多根系分布比例, 并且具有更多的细根, 对于养分和水分的吸收具有重要意义<sup>[15]</sup>, 这与张旭东等<sup>[16]</sup> 研究结果类似。根径  $>1$  mm 的根长在  $N_{250}$  和  $N_{380}$  处理间并未表现出显著差异, 表明  $N_{380}$  对根系生长的抑制主要是抑制细根生长, 并未对轴根生长产生显著影响, 而  $N_{250}$  处理在促进轴根生长的同时也促进了侧根的生长。

大多数研究表明<sup>[17]</sup>, 在中度低氮条件下更有利

于植物形成壮硕的根系,高浓度硝酸盐的供应会抑制根系的生长,郭亚芬等<sup>[9]</sup>进行的培养试验表明,外界硝酸盐供应在 1 mmol/L 以下时,随着硝酸盐浓度增加有利于侧根的生长,硝酸盐浓度高于 1 mmol/L 之后侧根生长受到抑制,高于 5 mmol/L 时,侧根的发生也会受到抑制。大田条件下适度施肥促进了根系生长,形成了较大的根表面积和根体积,使得根系与土壤拥有更大的接触面积,有利于促进根系对于水分和养分的吸收,形成较大的根体积,对增强植株固定能力、植株抗倒伏性具有重要意义<sup>[18]</sup>。在我们的研究中,过量施肥在拔节期明显抑制了根系生长,但是开花期却表现出浅层土壤中抑制根系生长,深层土壤的根长、根重、根表面积和根体积有所提高,在田间覆膜条件下,降雨分布不均和夏季降雨频发,硝酸盐在土壤中是不断运移的<sup>[19]</sup>,在开花期随着降雨的增多导致硝酸盐的向下加速运移,引起开花期土壤深层硝酸盐浓度降低,一定程度上反而促进了根系生长。因此在降雨量较多的 2018 年,过量施氮对于 0—100 cm 土壤剖面根系生长的抑制程度较相对干旱的 2017 年有所减弱。

## 4 结论

在覆膜栽培条件下,适当的氮肥投入能刺激根系生长,显著增加了根干重,根长、根表面积和根体积,过量的氮肥投入显著抑制根系生长,氮肥施用对根系生长和空间分布的影响主要体现在表层 0—30 cm 土层,适度施氮会有更多的细根产生,更加有利于水分养分的吸收,过量施肥主要抑制细根生长,对轴根生长影响不大;250 kg/hm<sup>2</sup> 是本地区适宜根系生长的氮肥施用量,而过高氮肥投入在造成资源浪费的同时会显著的抑制根系生长。

### 参考文献:

- [1] Lynch J. Root architecture and plant productivity[J]. *Plant Physiology*, 1995,109(1):7-13.
- [2] 张杨,沈玉芳,李世清.施肥对于旱胁迫下夏玉米根系提水的调节作用研究[J].*西北植物学报*,2009,29(3):535-541.
- [3] Liu X, Xiao G L, Long H, et al. Film-mulched ridge-furrow management increases maize productivity and sustains soil organic carbon in a dryland cropping system[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(4):1434-1441.
- [4] 查丽,谢孟林,朱敏,等.垄作与覆膜对川中丘陵春玉米根系分布及产量的影响[J].*应用生态学报*,2016,27(3):855-862.
- [5] Wang L, Li X G, Guan Z H, et al. The effects of plastic-film mulch on the grain yield and root biomass of maize vary with cultivar in a cold semiarid environment [J]. *Field Crops Research*, 2018,216(18):89-99.
- [6] 彭云峰,张吴平,李春俭.不同氮吸收效率玉米品种的根系构型差异比较:模拟与应用[J].*中国农业科学*,2009,42(3):843-853.
- [7] 米国华,陈范骏,吴秋平,等.玉米高效吸收氮素的理想根构型[J].*中国科学:生命科学*,2010,40(12):1112-1116.
- [8] 汪洪,高翔,陈磊,等.硝态氮供应下植物侧根生长发育的响应机制[J].*植物营养与肥料学报*,2011,17(4):1005-1011.
- [9] 郭亚芬,米国华,陈范骏,等.局部供应硝酸盐诱导玉米侧根生长的基因型差异[J].*植物营养与肥料学报*,2005,11(2):155-159.
- [10] Fang Q, Ma L, Yu Q, et al. Irrigation strategies to improve the water use efficiency of wheat-maize double cropping systems in North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2010,97(8):1165-1174.
- [11] Kuchenbuch R O, Gerke H H, Buczko U. Spatial distribution of maize roots by complete 3D soil monolith sampling[J]. *Plant and Soil*, 2009,315(1/2):297-314.
- [12] 马金平,王卫锋,朱宝才,等.灌水定额对覆膜滴灌玉米根系分布和籽粒产量的影响[J].*中国水土保持科学*,2018,16(6):64-70.
- [13] Gao Y, Xie Y, Jiang H, et al. Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching[J]. *Field Crops Research*, 2014, 156(2):40-47.
- [14] 王秀康,李占斌,邢英英.覆膜和施肥对玉米产量和土壤温度、硝态氮分布的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2015,21(4):884-897.
- [15] Wells C E, Eissenstat D M. Beyond the roots of young seedlings:the influence of age and order on fine root physiology [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2002,21(4):324-334.
- [16] 张旭东,王智威,韩清芳,等.玉米早期根系构型及其生理特性对土壤水分的响应[J].*生态学报*,2016,36(10):2969-2977.
- [17] 王艳,米国华,陈范骏,等.玉米氮素吸收的基因型差异及其与根系形态的相关性[J].*生态学报*,2003,23(2):297-302.
- [18] Lynch J P. Steep, cheap and deep:an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems [J]. *Annals of Botany*, 2013,112(2):347-357.
- [19] 黎晓,朱伟,杨沙沙,等.旱地垄沟覆膜栽培对土壤硝酸盐时空分布和玉米产量的影响[J].*中国土壤与肥料*,2016(5):110-117.