

水密调控对小麦产量及经济效益的影响

吴儒刚¹, 苏誉¹, 刘文海¹, 朱元刚², 张英霞³, 范业泉¹, 张超¹

(1. 德州市农业科学研究所, 山东德州 253015; 2. 德州学院生命科学学院, 山东德州 253023; 3. 临邑县恒源街道办事处, 山东临邑 251500)

摘要 以抗旱小麦新品种阳光 18 为试验材料, 研究不同灌水次数和密度组合对小麦产量、产量构成因素及经济效益的影响, 旨在丰富小麦新品种阳光 18 的高产高效栽培技术, 为推广应用提供理论依据。结果表明, 小麦产量随灌水次数的增加而增加。从群体动态来看, 基本苗多的处理产量较高, 但 270 万/hm² 基本苗的处理略高于 360 万株/hm² 基本苗的处理, 表现最佳。从产量结果来看, W2T2 组合(灌拔节水+灌浆水+270 万株/hm²)产量最高, 达到 8 811.60 kg/hm²。从经济效益来看, W1T2 组合(只灌拔节水+270 万株/hm²)经济效益最高, 达到 6 661.13 元/hm²。因此, 从国家粮食安全的角度来看建议采用春季灌拔节水和灌浆水, 播种量以基本苗 270 万株/hm² 为宜; 从农业收入的经济效益角度来看, 建议采用春季灌 1 次拔节水、基本苗播种量 270 万株/hm²。

关键词 水密调控; 抗旱型小麦; 籽粒产量; 经济效益

中图分类号 S512.1 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)07-0018-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.07.005



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Water Density Regulation on Grain Yield and Economic Benefits of Wheat

WU Ru-gang, SU Yu, LIU Wen-hai et al (Dezhou Academy of Agricultural Sciences, Dezhou, Shandong 253015)

Abstract In order to enrich the high-yield and high-efficiency cultivation technique rules of the new wheat variety Yangguang 18 and provide theoretical guidance for its popularization and application, the relationship between the combination of different irrigation frequency and density and wheat yield, three factors of yield formation and economic benefit was studied by using the new wheat variety Yangguang 18 as experimental material. The results showed that the more irrigation times, the higher the yield. The yield of 2 700 000 plants/hm² basic seedlings was greater than those of other two treatments. And the population dynamics of 2 700 000 plants/hm² basic seedlings was the best. In terms of different water-tight combinations, the yield of W2T2 treatment was the highest, reaching 8 811.60 kg/hm². One-time irrigation and 270 000 plants/hm² basic seedlings (W1T2) had the highest economic benefit, reaching 6 661.13 Yuan/hm². Thus, spring irrigation jointing water and grouting water were recommended from the perspective of national food security. The appropriate sowing amount for basic seedlings was 2 700 000 plants/hm². From the perspective of economic benefit of agricultural income, we suggested to adopt the treatment of one-time irrigation in spring and 2 700 000 plants/hm² sowing amount of basic seedlings.

Key words Water density regulation; Drought resistant wheat; Seed yield; Economic performance

小麦作为我国,特别是北方人民的口粮作物,在饮食结构中的比例较高^[1],其高产、稳产关系着国家的粮食安全。水是农业生产的命脉,是关系着国计民生的基础性自然资源^[2]。小麦农业用水较多,约占农业用水的 70%,生育期内至少灌溉 1~3 次才能确保小麦稳产高产^[3]。黄淮海区是我国最大的小麦产区,时空、区域水资源匮乏,不能满足小麦用水需求,因此小麦持续增产压力较大,节约集约用水已成为黄淮海区小麦稳产增产的必然选择^[4]。小麦是分蘖作物,自身调节能力强,其产量并不与播种密度成正比^[5]。因此,探索新育成品种高产高效合理群体^[6]尤为重要。为此,李伟华等^[7]通过对百农 418 不同密度下的群体动态、产量及农艺性状的研究,得出种植密度与产量呈抛物线函数关系。由海霞^[8]认为,合理高效的群体,要求基本苗有一定的阈值,低于这个阈值时叶面积指数下降,造成空间浪费;高于这个阈值时,虽能形成超大群体,但后期群体郁闭,叶片老化加快,光照环境恶化,容易造成小麦倒伏,更易造成小麦减产。

近年来,随着城镇化进程的不断加快,农村青壮年劳动力向城镇集中^[9]。小麦播种、收获、病虫害防治等农事活动的机械化、现代化已逐渐被接受。高效节水灌溉设备成本较高^[10],小农户投资能力有限,且局部地区存在土壤返盐现

象^[11],“小白龙”灌溉方式仍然是广大农村灌溉的普遍方式。灌溉成本高且劳动力工资不断上涨,粮食收储价格却在低位震荡,导致小麦净收益下滑明显,极大挫伤了种粮生产者的积极性^[12],急需改善小麦水分管理方式^[13]。

阳光 18 号为早肥的小麦新品种,分蘖力强、成穗率高,王成超等^[14]已研究了该品种适宜的种植密度,但是鲜见对灌水量同播种量的协调作用的研究。鉴于此,笔者对灌水量与播种量协调作用小麦产量和经济效益方面进行研究,从粮食安全和利润最大化 2 个方面进行协调,从而制定出最佳的小麦栽培技术措施,设置了 3 个灌溉水平和 3 个播种量,以期筛选合理的种植密度和灌溉次数,为实现节水高产高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验于 2019—2020 年度在德州市德城区黄河涯镇黄河涯村德州市农科院试验基地进行。试验地土壤类型为壤土,0~20 cm 耕层土壤有机质含量 15.7 g/kg,全氮含量 1.02 g/kg,碱解氮含量 80.2 mg/kg,速效磷含量 67.4 mg/kg,速效钾含量 103.6 mg/kg。玉米秸秆全部还田,并深翻掩埋 25 cm 土层以下;整地前 10 d 造墒,基肥种类和数量为:纯氮 225 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm² 和 K₂O 150 kg/hm²,拔节期追施纯氮 150 kg/hm²,不灌水处理的追肥方式为开沟撒施并掩埋,只灌拔节水、灌拔节水和灌浆水的方式为随水撒施。

作者简介 吴儒刚(1980—),男,山东临邑人,正高级农艺师,从事小麦育种及栽培研究。

收稿日期 2022-05-12; **修回日期** 2022-06-23

1.2 供试材料 试验选取抗旱型小麦新品种阳光 18 为供试材料,该品种为半冬性,幼苗半匍匐,株型紧凑,叶色浓绿,叶片上冲,熟相好。生育期 229 d,熟期与对照鲁麦 21 号相当;株高 72.5 cm,穗纺锤形,长芒、白壳、白粒,籽粒硬质,越冬抗寒性较好,抗倒伏性较好。2018 年由山东省农作物品种审定委员会审定,审定编号为鲁审麦 20180027。

1.3 试验设计 试验采取二因素裂区设计,水分处理为主区,种植密度为副区。分别设置 3 个灌水处理:不灌水(W0 处理)、只灌拔节水(W1 处理)、灌拔节水和灌浆水(W2 处理);3 个种植密度:180 万株/hm²(T1 处理)、270 万株/hm²(T2 处理)、360 万株/hm²(T3 处理)。

1.4 播种方式 使用小区精密播种机播种,随机排列,重复 3 次,小区面积为 9.0 m²(6.0 m×1.5 m),行距 0.2 m。田间管理同常规大田管理。播种时间为 2019 年 10 月 12 日,于 2020 年 6 月 8 日小区全部收获。

1.5 指标测定

1.5.1 产量及其构成因素的测定。成熟期每个小区随机选取 2 个能代表整体状况的 1 m 双行样段,调查总穗数,折算成穗数;随机选取 30 个单穗晒干,人工脱粒筛净后数粒仪计

数总粒数,换算成单穗粒数;按小区全部收获筛净晒干至含水量 13%时的籽粒产量计为小区产量;小区收获的籽粒中随机取 500 粒,2 次重复,取平均值换算成千粒重。

1.5.2 经济效益的测定。根据试验小区产量以及不同处理所用的农用成本,计算其经济效益。

经济效益=产量效益 - 电费成本 - 人工成本 - 用种成本 - 综合成本。

1.6 数据处理 采用 Excel 2007 软件进行数据整理;采用 DPS 7.05 软件进行差异显著性分析($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同水密调控处理对阳光 18 产量及其构成因素的影响 小麦产量高低与灌水次数及种植密度密切相关^[15]。灌水次数与种植密度及其互作对阳光 18 产量及其构成因素的影响见表 1。由表 1 可知,在 W0 处理条件下,各密度处理的产量随着密度的增加而增加,但增幅降低;在 W1、W2 条件下,随着密度的增加,各处理产量出现先增加后减少的趋势。

方差分析(表 2)结果显示,在该试验条件下,不同水分处理间、不同密度处理间差异均达到极显著水平,水分和密度的交互效应也达到极显著水平。

表 1 不同水密调控处理对阳光 18 产量及其构成因素的影响

Table 1 Effects of water treatment and density treatment on yield and yield components of wheat

水分处理 Water treatment	密度处理 Density treatment 万/hm ²	穗数 Panicle number 万个/hm ²	单穗粒数 Grains per panicle//粒	千粒重 1 000- grain weight//g	产量 Yield kg/hm ²
W2	T1	838.04±24.58 b	27.73±3.53 a	51.56±0.37 c	8 129.31±189.89 d
	T2	924.71±22.48 a	26.66±0.58 ab	50.95±0.35 c	8 602.35±310.49 a
	T3	860.71±10.07 b	23.03±1.71 cd	49.15±0.83 e	8 312.52±705.13 ab
W1	T1	692.03±10.58 d	26.16±2.33 ab	50.03±0.39 d	7 014.78±4.99 e
	T2	775.37±11.02 c	25.38±0.28 abc	48.66±0.15 e	7 622.74±305.93 c
	T3	747.37±13.01 c	24.83±0.91 abc	47.96±0.03 f	7 366.79±279.26 bc
W0	T1	464.02±19.29 g	23.83±0.44 bcd	53.23±0.13 a	5 230.12±595.14 h
	T2	516.69±13.01 f	20.91±0.70 d	52.48±0.13 b	6 281.86±78.95 g
	T3	554.03±21.07 e	21.79±0.29 d	51.45±0.31 c	6 792.93±105.6 f

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase in the same column indicated significant differences at 0.05 level.

表 2 不同水密调控处理对小麦产量的方差分析

Table 2 Variance analysis of winter wheat yield affected by different combination treatments

变异来源 Source of variation	平方和 Quadratic sum	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
区组间 Inter-group	20.222 2	2	10.111 1	0.378 6	0.690 8
水分处理 Water treatment	147 301.667 0	2	73 650.833 5	109.054 1	0.000 3
密度处理 Density treatment	17 332.532 4	2	8 666.266 2	12.832 1	0.018 2
水分×密度 Water×density	2 701.441 0	4	675.360 3	25.288 0	0.000 1
误差 Error	427.308 6	16	26.706 8		
总变异 Total variation	167 783.171 2	26			

注: $F_{0.05(2,16)} = 3.63$; $F_{0.01(2,16)} = 2.67$ 。

2.2 不同灌水、种植密度处理对阳光 18 产量及其构成因素的影响 穗数、单穗粒数和千粒重之间相互制约、相互联系,共同决定着小麦产量的高低。从表 3 可以看出,主处理,即不同灌水次数间产量及构成因素间有差异,穗数和产量均随灌水次数的增加呈上升趋势,W2 和 W1 处理间单穗粒数

差异不明显但明显高于 W0 处理,千粒重处理间差异不明显。副处理,即不同密度处理间的产量及其构成因素存在差异,以 270 万株/hm² 密度处理的穗数最高,明显高于 360 万和 180 万株/hm² 密度处理;单穗粒数随密度增加而下降,180 万株/hm² 密度处理明显高于 360 万株/hm² 密度处理;千

粒重随密度增加呈现下降趋势且处理间差异明显,由密度180万株/hm²增加至360万株/hm²时,各灌水处理均下降2.00 g左右;产量随密度增加而明显增加。

随着灌水次数的增加,阳光18产量表现为增加趋势,

W1和W2处理的产量分别比W0处理增产35.74%、41.33%;随着种植密度的增加,阳光18产量表现为增加的趋势,270万和360万株/hm²基本苗处理比180万株/hm²基本苗处理分别增产9.92%、12.43%。

表3 不同灌水和种植密度处理对阳光18产量及其构成因素的影响

Table 3 Effects of water treatment and density treatment on yield and yield components of wheat

处理 Treatment	处理编号 Treatment code	穗数 Panicle number 万个/hm ²	单穗粒数 Grains per panicle//粒	千粒重 1 000-grain weight//g	产量 Yield kg/hm ²
主处理(灌水次数)	W2	874.50	25.81	50.55	8 553.30
Main treatment	W1	729.30	25.46	48.88	8 215.05
	W0	511.65	22.18	52.39	6 052.20
副处理(密度)	T1	664.65	25.91	51.61	7 079.25
Sub-treatment	T2	751.35	24.32	50.70	7 781.85
	T3	699.30	23.22	49.52	7 959.45

2.3 不同组合处理对阳光18经济收益的影响 该试验条件下,小麦收益只计算小麦籽粒产量出售所获得的经济效益,小麦生产过程中的投入成本为地租、购买种子的数量、田间农事操作投入、肥料投入,其中田间农事操作包括旋地、播种、浇水、病虫害管理、收获,具体投入产出见表4。

从表4可以看出,在该试验条件下,种植小麦的成本投入差距主要体现在播种量成本和浇水所涉及的电费和人工成本,其中人工成本的比重最大,这也是目前黄淮海区小农户小麦生产的难点问题。小麦纯收益超过6 000.00元/hm²的组合为W2T2、W1T2和W1T3,其中以小麦只灌拔节水、基

本苗270万株/hm²组合(W1T2)处理的纯收益最高,达到6 661.13元/hm²,小麦纯收益最少的组合为小麦不浇水、基本苗为180万株/hm²的组合,其纯收益仅为469.81元/hm²。

从表5可以看出,主处理,即灌水次数的增加明显提高了产量收益,但人工成本的提高抵消了部分收入,所以导致W2和W1处理间纯收入差异不明显,但明显高于W0处理,纯收入分别比W0处理增加4 302.75和4 431.75元/hm²。副处理,即不同密度处理纯收入随密度增加而增加;与180万株/hm²处理相比,270万和360万株/hm²处理纯收入分别增加1 552.93和1 793.28元/hm²。

表4 不同水密调控组合处理对阳光18经济收益的影响

Table 4 Effects of water treatment and density treatment on economic performance of Yangguang 18

水密 组合 Treatment comb- ination	生产投入 Production input//元/hm ²											生产收入 Production income			纯收入 Net income 元/hm ²	
	地租 Land rent	播种 Sowing amount	单价 Unit price	费用 Expense	旋地 Rotation	播种 Sowing seeds	肥料 Fert- ilizer	水电费 Water and electricity fee	农药费 Pest- icide cost	人工费 Cost of labor	收获 Harv- esting	合计 Total	产量 Yield kg/hm ²	单价 Unit price 元/hm ²		经济收入 Economic income 元/hm ²
W2T1	4 500	92.40	4.4	406.56	900	375	2 250	750	600	4 800	900	15 481.56	8 130.00	2.5	20 325.00	4 843.44
W2T2	4 500	138.75	4.4	610.50	900	375	2 250	750	600	4 800	900	15 685.50	8 811.60	2.5	22 029.00	6 343.50
W2T3	4 500	184.95	4.4	813.78	900	375	2 250	750	600	4 800	900	15 888.78	8 718.60	2.5	21 796.50	5 907.72
W1T1	4 500	92.40	4.4	406.56	900	375	2 250	375	600	4 200	900	14 506.56	7 507.35	2.5	18 768.38	4 261.82
W1T2	4 500	138.75	4.4	610.50	900	375	2 250	375	600	4 200	900	14 710.50	8 548.65	2.5	21 371.63	6 661.13
W1T3	4 500	184.95	4.4	813.78	900	375	2 250	375	600	4 200	900	14 913.78	8 589.15	2.5	21 472.88	6 559.10
W0T1	4 500	92.40	4.4	406.56	900	375	2 250	0	600	3 600	900	13 531.56	5 600.55	2.5	14 001.38	469.81
W0T2	4 500	138.75	4.4	610.50	900	375	2 250	0	600	3 600	900	13 735.50	5 985.60	2.5	14 964.00	1 228.50
W0T3	4 500	184.95	4.4	813.78	900	375	2 250	0	600	3 600	900	13 938.78	6 570.75	2.5	16 426.88	2 488.10

3 小结

小麦产量不仅与品种自身的特性有关,还与灌水次数、种植密度等栽培措施密切相关。辛秀竹等^[16]认为,春季灌水次数与有效穗数无关;而郭振清等^[17]则认为,减少灌水次数会导致穗数减少;高振贤等^[18]也认为,春季灌水能提高穗数。该试验中,灌水次数与穗数呈正相关关系,这与郭振清等^[17-18]的观点相一致。该试验结果表明,在一定范围内,增加密度提高产量的主要因素是穗数的增加,但是对穗粒数和千粒重的影响却存在不同意见。部分学者认为,增加种植密度会降低穗粒数,但是对千粒重影响不明显^[19-20];而于振文^[21]研究

表明,随着种植密度的升高,穗粒数增多,千粒重降低;朱云集等^[22]则认为,增加种植密度,千粒重和穗粒数总体下降。该试验条件下,随着播种密度的增加,穗数相应增加,穗粒数和千粒重逐渐降低与朱云集等^[22]的观点相一致。

农业生产倡导高产高效。小麦作为口粮作物,其产量关系国计民生、长治久安,同时还要保证小麦经营者的利益。目前,我国小麦种植正在集约化发展,土地面积逐步集中,大型机械化耕种收、水肥一体化、无人机病虫害防治等措施大大降低农业生产的成本。但是,仍有部分新型经营主体存在地块分散、水浇条件受限、现代高新技术无法施展的问题。

笔者将农业灌水的劳动力成本单独核算,就是基于这类经营主体
主体的劳动力成本越来越高,旨在呼吁国家出台相关政策,切实保障此类经营主体。

表 5 不同灌水处理、种植密度对阳光 18 经济效益的影响

Table 5 Effects of water treatment and density treatment on economic performance of Yangguang 18

处理 Treatment	处理编号 Treatment code	生产投入 Production input//元/hm ²											生产收入 Production income				
		种子 Seed				旋地 Rotation	播种 Sowing seeds	肥料 Fert- ilizer	水电费 Water and electricity fee	农药费 Pest- icide cost	人工费 Cost of labor	收获 Harv- esting	合计 Total	产量 Yield kg/hm ²	单价 Unit price 元/hm ²	经济收入 Economic income 元/hm ²	纯收入 Net income 元/hm ²
		地租 Land rent	播量 Sowing amount	单价 Unit price	费用 Expense												
主处理 (灌水次数)	W2	4 500	138.75	4.4	610.50	900	375	2 250	750	600	4 800	900	15 685.50	8 553.45	2.5	21 383.63	5 698.13
	W1	4 500	138.75	4.4	610.50	900	375	2 250	375	600	4 200	900	14 710.50	8 215.05	2.5	20 537.63	5 827.13
Main treatment	W0	4 500	138.75	4.4	610.50	900	375	2 250	0	600	3 600	900	13 735.50	6 052.35	2.5	15 130.88	1 395.38
副处理 (密度)	T1	4 500	92.40	4.4	406.56	900	375	2 250	375	600	4 200	900	14 506.56	7 079.25	2.5	17 698.13	3 191.57
	T2	4 500	138.75	4.4	610.50	900	375	2 250	375	600	4 200	900	14 710.50	7 782.00	2.5	19 455.00	4 744.50
Sub-treatment	T3	4 500	184.95	4.4	813.78	900	375	2 250	375	600	4 200	900	14 913.78	7 959.45	2.5	19 898.63	4 984.85

参考文献

- [1] 陆贇曾. 山东小麦遗传改良[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 1.
- [2] 任玉芬, 苏小婉, 贺玉晓, 等. 中国生态地理区城市水资源利用效率及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6459-6471.
- [3] 冯素伟, 张保军, 谢惠民, 等. 灌水和非灌水条件下冬小麦水分的利用特点研究[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(5): 84-87.
- [4] 宋秋英, 赵德芳, 刘恩民, 等. 鲁西北灌区农业水资源特征及评价方法刍议[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(S1): 112-116.
- [5] 葛连兴, 李迎春, 彭正萍, 等. 基于 DSSAT 模型河北省冬小麦优化栽培管理方式模拟研究[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(2): 18-23.
- [6] 王德轩, 张正斌, 柴守玺, 等. 高产小麦合理群体和个体动态结构[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(2): 94-104.
- [7] 李伟华, 张静, 郭振升, 等. 种植密度对“百农 418”小麦群体动态、产量及农艺性状的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(12): 1-6.
- [8] 由海霞. 不同密度小麦群体的光合作用特性研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(4): 162-165.
- [9] 郭志广. 农村劳动力外流与粮食安全研究: 从冲突到一致的路径选择和制度安排[D]. 成都: 西南财经大学, 2013.
- [10] 景俊生. 大中型农业滴灌设计现存问题及改进建议[J]. 农业技术与装备, 2021(10): 15-16.
- [11] 胡琴, 陈为峰, 宋希亮, 等. 不同灌水量对黄河三角洲盐碱地改良效果研究[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 305-310, 325.
- [12] 姚艳春, 刘元义, 牛国栋, 等. 山东旱作灌区小麦-玉米全程机械化技术模式经济效益分析与评价方法[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(12): 6-11.
- [13] 殷海善, 石莎, 秦作霞. 劳动力成本上升对农业生产的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40(9): 1003-1005.
- [14] 王成超, 李宝红, 王柏方. 小麦新品种阳光 18 节水条件下适宜密度探讨[J]. 农业科技通讯, 2020(4): 28-30.
- [15] 张秀, 朱文美, 董述鑫, 等. 灌水量与密度互作对冬小麦籽粒产量和水充分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 163-174.
- [16] 辛秀竹, 石怡彤, 张璐鑫, 等. 土壤耕作与春季灌水次数对冬小麦产量要素与经济效益的影响[J]. 节水灌溉, 2021(10): 18-23.
- [17] 郭振清, 刘添, 张敏, 等. 减少灌水次数对河北冬性强筋小麦产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(6): 731-737.
- [18] 高振贤, 史占良, 韩然, 等. 不同灌水模式对小麦产量、形态和生理特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(10): 1234-1240.
- [19] 马东钦, 王晓伟, 朱有朋, 等. 播种期和种植密度对小麦新品种豫农 202 产量构成的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(1): 91-94.
- [20] 谢荣, 刘志清, 张东志, 等. 播种密度对新研 7 号小麦产量及构成因素的影响[J]. 农业科技通讯, 2021(12): 72-74.
- [21] 于振文. 不同密度条件对冬小麦小花发育的影响[J]. 作物学报, 1984, 10(3): 185-194.
- [22] 朱云集, 郭汝礼, 郭天财, 等. 行距配置与密度对兰考 906 群体质量及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(2): 62-66.
- [23] 姜蕾. 水环境中 PPCPs 类新型污染物监测及控制技术展望: 新型污染物监测平台、污染源识别及末端控制[J]. 净水技术, 2016, 35(6): 1-5.
- [24] ZHANG Z X, ZHANG D D, ZHANG X. Simultaneous determination of pharmaceutical and personal care products in wastewater by capillary electrophoresis with head-column field-amplified sample stacking[J]. Analytical methods, 2014, 6(19): 7978-7983.
- [25] SALGADO R, MARQUES R, NORONHA J P, et al. Assessing the diurnal variability of pharmaceutical and personal care products in a full-scale activated sludge plant[J]. Environmental pollution, 2011, 159(10): 2359-2367.
- [26] DENG Y, LI B, YU K, et al. Biotransformation and adsorption of pharmaceutical and personal care products by activated sludge after correcting matrix effects[J]. Science of the total environment, 2016, 544: 980-986.
- [27] 李想, 耿金菊, 吴刚, 等. 活性污泥和生物膜模型预测污水中 PPCPs 去除研究进展[J]. 环境化学, 2022, 41(3): 918-928.
- [28] BERETTA M, BRITTO V, TAVARES T M, et al. Occurrence of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in marine sediments in the Todos os Santos Bay and the north coast of Salvador, Bahia, Brazil[J]. Journal of soil & sediments, 2014, 14(7): 1278-1286.

(上接第 12 页)