



玉米新品种金玉 2208 的选育实践与思考

王天宇, 祝云芳, 郭向阳, 王安贵, 吴 迅, 刘鹏飞, 陈泽辉
(贵州省农业科学院旱粮研究所, 贵阳 550006)

摘 要:针对贵州西部低温寡照、春旱严重、后期阴雨连绵和土壤瘠薄的生态环境,开展早熟、耐瘠、耐低温阴雨、抗病性好且籽粒脱水快的玉米新种质创制与杂交种选育。利用“两群双向选择组配”理论,以 QB 1018 (母本)和 QB 2232 (父本)组配多抗、高产的玉米新品种金玉 2208 (黔审玉 20200033);适合贵州省毕节市和六盘水市海拔 1 400~2 200 m 中上等肥力土壤的玉米产区种植,该品种能在北方制种,有效解决热带种质制种温光反应问题。

关键词: 玉米; 品种选育; 杂优模式; 育种实践

DOI: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2022.07.114

中图分类号: S 513 文献标志码: A 文章编号: 1001-4705(2022)07-0114-05

Breeding Practice and Thinking of a New Maize Variety Jinyu 2208

WANG Tianyu, ZHU Yunfang, GUO Xiangyang, WANG Angui,
WU Xun, LIU Pengfei, CHEN Zehui

(Institute of Upland Food Crops, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China)

Abstract: Aiming at the ecological environment of low temperature and little sunshine, severe spring drought, continuous rain in the later stage and poor soil in western Guizhou, the creation and hybrid breeding of new maize germplasms with early maturity, barren tolerance, low temperature and rain tolerance, good disease resistance and fast grain dehydration were carried out. Using the theory of "two-way selection and combination of two groups", QB 1018 (female parent) and QB 2232 (male parent) were used to combine a new maize variety Jinyu 2208 (Qian Shenyu 20200033) with multi-resistance and high yield which was suitable for Bijie City, and Liupanshui City in Guizhou Province where planted in maize production areas with an altitude of 1 400—2 200 meters in medium and upper fertile soils. This variety could be used for seed production in the north and effectively solves temperature and light reaction problems of tropical germplasm seed production.

Key words: maize; variety breeding; heterosis models; breeding practices.

贵州是西南玉米产区之一,其西部毕节市、六盘水市部分高寒春玉米区,海拔在 1 400~2 200 m 之间,平均气温在 12.1~13.5 °C 之间,播种面积达到 24.5 万 hm^2 ,占贵州省玉米播种面积的 33.5%,总产 123 万 $\text{t}^{[1]}$;该生态区生态环境复杂,表现出日照少、春旱严重、土壤瘠薄和后期阴雨导致穗腐病发生严重等特点。开展早熟、耐瘠、耐低温阴雨、抗病性好且籽粒脱水快的玉米种质创制显得尤为重要。同时,由于农业生产的发展和立体气候复杂多变,只以高产为育种目标已

不能满足市场需求,生产上更需要丰产性好、抗病性强、适应性广的“相对安全”的玉米品种。

1 育种思路

针对贵州省高海拔高寒山区玉米生产特点,选育耐寒性和耐瘠性好,抗病性强、灌浆和脱水速率快的品种,以适应贵州高海拔山区玉米品种的需求。温带种质一般具有籽粒脱水快、出籽率高等特点;热带玉米 Suwan 种质具有抗叶斑病强,抗旱耐瘠性好等特点。

收稿日期:2022-01-11

基金项目:国家重点研发计划项目“云贵高原及武陵山区高海拔山地抗逆高产耐瘠薄玉米新品种培育”(2018 YFD 0100104);贵州省高层次创新型人才项目[黔科合平台人才(2018)5629];贵州省基金“玉米籽粒脱水相关性状 QTLQ 41 GN-SL 的精细定位与候选基因分析”[黔科合基础(2020)1 Z 019]。

作者简介:王天宇(1971—),男(苗族),贵州黄平人;本科,副研究员,主要从事玉米种子生产与推广(E-mail:283839735@qq.com)。

通讯作者:陈泽辉(1962—),男(汉族),贵州瓮安人;博士,研究员,主要从事玉米遗传育种研究(E-mail:chenzh907@sina.com)。

因此,采用“温带种质或温带种质改良×Suwan种质”杂优模式,以期育成适宜该区域生产的玉米杂交种。

2 金玉2208的选育过程

2.1 亲本选育及杂交种组配

根据“两群双向选择组配”理论育种策略,选用“Reid×Lancaster”和“Suwan”两个材料为亲本群,分别进行双向改良选择,加大双亲的遗传距离,增加双基因频率差异,选育新的自交系和组配杂交种,以提高育种效率^[24]。2011年,以先玉222(BSSS×Lancaster)为基础材料,经混合授粉和3年6代连续自交选育而成QB1018;用Suwan血缘自交系QB48与T32杂交,组建基础群体,导入QR273进行改良选系,丰富其遗传基础,通过贵州—海南—甘肃三地穿梭选育,让群体材料在不同纬度气候条件进行感光驯化选育。经4年7代自交选育而成QB2232(见表1)。

表1 金玉2208的亲本特征特性
Table 1 The parent Characteristics of Jinyu 2208

亲本	特征特性
QB1018 (母本)	株型较紧凑,叶色浓绿,生育期115 d,株高223 cm,穗位高87 cm,穗长16 cm,穗粗4.7 cm,穗行数12~16行,行粒数32粒,百粒重31.0 g,出籽率85%。雄穗分枝6个,雄穗主轴长15 cm,侧枝长9 cm,雄花护颖有紫色条纹,颖基深紫色,花药紫色;雌穗花丝紫色。籽粒黄色、马齿型,红轴,果穗筒型。2019年2月已申请国家植物新品种权保护并受理,申请号:20191000261
QB2232 (父本)	株型较紧凑,生育期122 d,株高190 cm,穗位高90 cm,穗长16.1 cm,穗粗4.5 cm,穗行数14~16行,行粒数34粒,百粒重32.2 g,雄穗分枝10个,雄穗主轴长28 cm,最高位侧枝以上主轴长26 cm,穗上叶片轻度下披,雄花护颖绿色,花药黄色,雌穗花丝绿色;籽粒黄色,硬粒型,白轴。2019年7月已申请国家植物新品种权保护并受理,申请号:20191002692

2015年冬季,在海南三亚,利用QB1018(母本)与QB2232(父本)组配,2016—2017年进行多点鉴定,该组合表现出出籽率高、丰产稳产性好、品质优良等特点。2018—2019年参加贵州省高山组玉米新品种区域试验,2019年参加贵州省玉米生产试验高山组;2020年通过贵州省农作物品种审定委员会审定。

2.2 综合表现

2018年在贵州省高山组玉米新品种区域试验中,金玉2208的平均产量为864.3 kg/667 m²,比西抗18(ck)增产16.1%,产量居第2位,8试点均增产,增产点占总试点数的100%;2019年平均产量为736.4 kg/667 m²,比ck增产5.05%,产量居第4位,增产点占总试点数的71.4%。两年16点次平均产量为800.35 kg/667 m²,比ck增产10.58%;2018年和2019年试点产量比ck增产点率85.7%(表2)。2019年生产试

验平均产量722.7 kg/667 m²,比ck增产6.07%,6试点4增2减,增产点率为66.7%。

金玉2208全生育期149 d,株高255.9 cm,穗位高105.5 cm,穗长18.9 cm,穗粗5.4 cm,穗行16~18行,秃尖1.1 cm,单穗粒重228.1 g,百粒重35.7 g,轴红色,半马齿型,籽粒黄色(表3)。穗上叶片轻度下披,雄穗分枝15个,雄穗主轴长44 cm,最高位侧枝以上主轴长30 cm,雄花护颖绿色,花药黄色,花丝绿色,果穗苞叶覆盖中,籽粒排列直。粗蛋白质(干基)含量8.54%,粗脂肪(干基)4.91%,粗淀粉(干基)74.23%,赖氨酸0.28%,容重770 g/L。经四川省农业科学院植保所鉴定,中抗丝黑穗病、纹枯病、穗腐病,抗大斑病、小斑病、茎腐病、灰斑病,详见表4。

3 选育思考

3.1 “温带种质×Suwan种质”杂优模式可用于高海拔山区玉米育种

高翔等^[22]分析研究20世纪六七十年代贵州玉米生产上主要推广的玉米品种后发现,其主推模式为“Suwan选系×贵州地方种质、温改地选系或温带种质选系”;郭向阳等^[12]研究了2000—2012年间贵州审定的115个品种,发现贵州西部的毕节市、六盘水市等高海拔山区主推的代表性品种杂优模式主要为(Suwan, Tuxpeno, 国内温带系)×地方种质、(PB, Tuxpeno)×Suwan, (PB, 热带系)×Lan. 和 Tuxpeno×热带系等4种模式;彭忠华等^[25]通过研究贵州不同生态条件下玉米杂种优势组配模式发现,贵州黔西北高海拔生态区,其主要模式为墨白类群×lancaster, 地方系×Suwan(热带种质), 国外热改温带种质×Suwan类群和地方系×地方系。高翔等^[6]、郭向阳等^[12]、彭忠华等^[25]分别从品种推广时间,生态类型分析贵州玉米主推杂优模式,由于分类方法和材料有所不同,杂优模式会有所不同,但都出现其中一个亲本材料为Suwan材料。“温带种质×热带种质(Suwan)”作为西南玉米育种广泛的杂优模式,得到西南育种界的认可^[27]。

20世纪90年代,采用“温带种质×热带种质(Suwan)”杂优模式的代表性品种贵毕302[(035-6×32-2)×苏37]、贵毕303[(035-6×77-1)×苏37],表现出极强的适应性,陈见超等^[26]通过引种试验,贵毕302和贵毕303分别比当地主推品种增产34.0%和32.88%,且具有抗丝黑穗病、品质好等特点,贵毕302和贵毕303曾一度成为贵州及西南地区高海拔玉米的主推品种。雅玉2号[78599×S37]则把“温带种质×热带种质(Suwan)”推向新的高度,曾在四川、重庆、

表 2 2018—2019 年贵州省玉米区域试验产量
Table 2 The regional trial output in 2018—2019

年度	产量 (kg/667 m ²)	ck 产量 (kg/667 m ²)	比 ck 增产 (%)	比 ck 增产 点率(%)	参试品种数量 (个)	位次
2018	864.3	774.4	16.10	100.00	13	2
2019	736.4	693.1	5.05	71.40	13	4
平均	800.35	733.75	10.58	85.70		

注:表中数据来源于 2018 年,2019 年贵州省高山组玉米新品种区域试验(第三组)综合总结。

表 3 2018—2019 年贵州省玉米区域试验高山组主要性状
Table 3 Main traits in alpine group of maize regional
experiment in Guizhou Province from 2018 to 2019

年度	生育期 (d)	比 ck [±] (d)	株高 (cm)	穗位 (cm)	穗长 (cm)	穗粗 (cm)	穗行数 (行)	行粒数 (粒)	秃尖 (cm)	单穗粒重 (g)	百粒重 (g)	轴色	粒型	粒色
2018	150.0	-7	259.0	108.0	19.0	5.6	18.0	39.0	0.6	237.0	34.0	红	半马齿型	黄
2019	148.7	-4	252.7	103.3	18.9	5.2	16.4	37.6	1.5	219.2	37.3	红	半马齿型	黄
平均	149.4	-5.5	255.9	105.5	18.9	5.4	17.2	38.3	1.1	228.1	35.7			

注:表中数据来源于 2018 年,2019 年贵州省高山组玉米新品种区域试验(第三组)综合总结。

表 4 金玉 2208 抗病性鉴定结果
Table 4 Identification results of disease resistance of Jinyu 2208

大斑病		小斑病		纹枯病		穗腐病		茎腐病		丝黑穗病		灰斑病	
病级	抗性	病级	抗性	病指	抗性	病级	抗性	病级	抗性	病级	抗性	病级	抗性
3	R	3	R	40.4	MR	4.5	MR	10	R	9.1	MR	3	R

注:表中数据来源于贵州省玉米区域试验参试品种抗病性鉴定结果。

表 5 2010—2020 年间贵州省审定部分玉米品种
Table 5 Part of maize varieties approved in Guizhou province from 2010 to 2020

品种名称	审定年份	母本来源	父本来源	组配模式	包含区域
金都玉 1 号	2010	吉 0821, 为苏 37×苏 11 选育	吉 201 为 7922×5003 选育		毕节市、六盘水市等
贵单 8 号	2010	P 159, 掖 478 改育选系;	T 32, Suwan 材料		毕节市、六盘水市等
筑黄 2 号	2011	筑苏-97 来源苏 37	HJ 01-3 为海禾 1 号(含 78599) 与交 51 杂交后代选系,		毕节市、六盘水市等
金玉 506	2012	QB 506, 来源于温带材料的辽单 933	QR 273, 苏湾材料		毕节市等
宝玉 999	2012	QS 089 是以(掖 478×渝 561)为 基础材料选育而成	QB 48 为苏湾材料选系	温带改系×Suwan 选系(改良系)	毕节市等
金玉 579	2017	QB 1013 为温带材料	QB 1923 为苏湾材料选系		毕节市等
友玉 8 号	2017	QB 1064 为温带材料选系	s 611 为苏湾材料选系		毕节市等
贵青 1 号	2018	PH 6 WC, 先锋材料	GD 909, 苏湾材料选系		毕节市、六盘水市等
金玉 818	2019	T 32, 苏湾材料	QB 506 来源于温带材料的辽丹 933		毕节市、六盘水市等
金玉 9608	2020	QB 2896, 温带种质改良选系	QB 2208, Suwan 选系		毕节市、六盘水市

注:表 5 来源于 2010—2020 年贵州省年农作物品种审定公告。

云南、贵州、湖南、湖北和广西等省区推广面积超110万 hm^2 ,累计增加社会效益11.35亿元,并获国家技术发明二等奖。近10年来,贵州审定的玉米品种中,适宜贵州毕节、六盘水等海拔1500m左右生态区域的品种中,部分采用“温带种质或温带种质改良 $\times$ Suwan种质”杂优模式(表5)。

金玉2208是以先玉222为基础材料,经过混粉和加代选择,选育出自交系QB1018,具有丰产性好、籽粒灌浆脱水快、苞叶蓬松、果穗脱粒快、出苗快和植株健壮等特点^[13];而另一个亲本QB2232是利用QB48、T32和QR273三个来源于Suwan种质自交系改良选育,充分利用了Suwan种质广泛的遗传基础、茎秆粗硬、根系发达、籽粒商品性好、抗叶斑病、高抗霜霉病、丝黑穗病和QB48的综合耐瘠性好等特点^[14-15,17];改良育成自交系QB2232,既保持Suwan材料广泛的适应性、配合力高、抗旱、耐瘠等特点,又克服了QB48雄穗苞叶散粉,T32穗上部叶片宽大、植株松散和QR273穗腐病较严重等问题。组配的金玉2208玉米新品种表现稳产、高产和抗逆性强等特点,在两年区域试验中表现突出。说明“温带种质 $\times$ Suwan种质”可作为高海拔山区杂优模式之一。

3.2 利用“两群双向选择组配”指导玉米育种实践,提高育种效率

王安贵等^[24]结合多年育种研究,在前人提出的杂种优势及双亲基因频率差异互补理论的基础上,结合团队育种实践,提出“两群双向选择组配”的育种策略;该方法是在某一杂种优势模式下,对两个群体进行改良时,尽量加大双亲的遗传距离,增加双亲的基因频率差异,提高育种效率,选育新的自交系再组配杂交种。

针对云贵及武陵山区高海拔山地复杂的生态环境,日照少、春旱严重、土壤瘠薄和后期阴雨导致穗腐病发生严重等特点。开展早熟、耐瘠、耐低温阴雨、抗病性好且籽粒脱水快的玉米种质创制显得尤为重要,培育出适宜该区域复杂生态环境的抗逆、耐瘠、抗病性强且脱水快的玉米杂交种。围绕育种目标,以先锋杂交种中选育出QB1013、QB1018等优良自交系;用具有抗旱、耐瘠性强的自交系QB48^[16],配合力高、抗逆性强的QR273^[23]和T32组成的热带种质群,充分地结合了材料优点,丰富其遗传基础^[17],育成自交系QB2232;用选育出的自交系组配新组合进行鉴定筛选,组配出适宜于贵州省高海拔的玉米新品种金玉2208。满足于该地区生产上所需品种丰产性好、籽粒灌浆脱水快、苞叶蓬松、果穗脱粒快、出苗快和植株健壮等特点^[13];进一步印证了用两群双向育种方法理论来指导

玉米育种实践方法可行,一定程度上提高育种效率,减少育种的盲目性,达到事半功倍。

3.3 育种材料进行异地驯化,钝化其感光性和感温性,解决种子生产问题

1978年,吴绍骅^[19]提出“异地培育”理论,为异地育种提供了理论依据,玉米育种者利用这一理论,成功应用南繁育种,为我国玉米育种的发展起到积极促进作用。然而,玉米从低纬度地区向高纬度地区的驯化育种起步较晚。贵州省旱粮研究所、贵州大学从2010年开始,在甘肃张掖、河南安阳、云南罗平等地进行玉米育种材料异地加代、驯化工作,开展“贵州—张掖(云南罗平)—海南”三地轮流种植加代驯化,通过多地多代驯化,已选育并驯化出一批(QB1923、QB2182、QB2232和QB2208等)育种材料,培育出金玉579、友玉876、金玉2208和金玉9608等一批玉米新品种,这些品种均可在甘肃张掖、武威地区生产种子,种子表现为质量和色泽等商品性好、发芽率高等特点。Suwan群体是西南玉米育种的核心种质材料,具有根系发达、茎秆坚硬、耐涝、抗旱性强、持绿性好、抗病性强、籽粒坚硬和外观品质好等特点,但Suwan材料 also 具有很强的温光反应、籽粒产量低等问题,特别在产业化过程中,以Suwan为亲本材料的杂交种子生产往往会受到亲本材料的温光反应限制,制种基地多选在南方,后期阴雨天数多,病害发生较重,严重影响玉米种子的产量和质量,导致制种产量不高、商品性差、制种成本高,在激烈竞争中无优势。因此,异地驯化育种材料,特别是Suwan材料从低纬度向高纬度引种驯化,可有效地钝化其感光性和感温性,能使在北方种子生产区进行制种,生产出种子质量优良,制种成本低,增强市场竞争优势。

参考文献:

- [1]陈泽辉.西南玉米生态区域划分及品种需求[J].山地农业生物学报,2016,35(3):1-9.
- [2]田恩阔,王涛,田飞,等.杂交玉米新品种禾睦玉918的选育研究[J].种子,2019,38(1):114-116.
- [3]王天宇,陈华璋,刘梅,等.杂交玉米新组合金单999的育苗制移栽种技术[J].种子,2008,27(1):97-98.
- [4]李世晓,王国基,李世程,等.玉米新品种五谷3861选育报告[J].甘肃农业科技,2019(1):5-7.
- [5]祝云芳,陈泽辉,任洪,等.国审玉米新品种金玉506的选育及应用[J].农业科技通讯,2014,42(9):176-178.
- [6]高翔,陈泽辉,祝云芳,等.高产多抗大穗型玉米新品种黔单



- 18 号的选育及配套技术[J].贵州农业科学,2004,32(6):5-6.
- [7]田恩阔,程尚明,王涛,等.玉米新品种禾睦玉 153 选育及配套技术研究[J].种子,2020,39(11):123-126.
- [8]王安贵,陈泽辉,祝云芳,等.优质高产稳产玉米杂交种华龙玉 899 的选育[J].贵州农业科学,2015,43(8):123-126.
- [9]王安贵,陈泽辉,祝云芳,等.优良玉米自交系 QB506 的选育与应用[J].种子,2020,39(7):142-146.
- [10]刘鹏飞,陈泽辉,郭向阳,等.高产稳产广适玉米新品种金玉 838 的选育[J].种子,2016,35(12):108-110.
- [11]喻本雨,陈泽恩,王成伟,等.高产优质玉米新品种卓玉 1 号的选育[J].种子,2016,35(9):97-98.
- [12]郭向阳,陈泽辉,祝云芳,等.贵州育成杂交玉米品种的产量变化与种质基础[J].西南农业学报,2014,27(4):1353-1357.
- [13]王安贵,陈泽辉,祝云芳,等.美国先锋种质在西南地区的利用途径探讨[J].种子,2011,30(8):74-75.
- [14]任洪,郑常强,杨斌,等.Suwan 种转的特点及在玉米育种中的利用[J].作物杂志,1998(增刊):45-46.
- [15]闫淑琴,苏俊,李春霞,等.对导入 Suwan1 玉米种质自交系的评价[J].玉米科学,2007,15(1):62-66.
- [16]祝云芳,陈泽辉,王安贵,等.优良玉米自交系 QB48 的选及应用[J].贵州农业科学,2014,42(7):13-16.
- [17]胡兴,陈泽辉,郭向阳,等.优良玉米自交系 Q273 改良系的遗传特征及其改良效果[J].贵州农业科学,2014,42(2):35-38.
- [18]张增川,王选路,李勤,等.陕西玉米南繁育种历史、现状思考[J].陕西农业科学,2018,64(12):73-75.
- [19]吴绍骥.关于玉米育种的几个问题[J].中国农业科学,1978(1):19-24.
- [20]陈冠铭,曹兵.国内外南繁育种制种发展综述[J].中国种业,2016,34(11):4-9.
- [21]黄开键,黄爱花,吴永升,等.Suwan1 群体改良穗行选择效应研究分析[J].玉米科学,2011,19(2):37-41.
- [22]高翔,陈泽辉,祝云芳,等.高产多抗大穗型玉米新品种黔单 18 号的选育及配套技术[J].贵州农业科学,2004,32(6):5-6.
- [23]郭向阳,陈泽辉,胡兴,等.不同供体对玉米自交系 QR273 的改良效应[J].玉米科学,2016,24(3):15-19.
- [24]王安贵,陈泽辉,吴迅,等.两群双向选择方法与及其在玉米育种中的应用与实践[J].贵州农业科学,2020,48(12):1-4.
- [25]彭忠华,戴保威,顾金春.贵州不同生态条件下玉米育种目标及杂种优势组配模式探讨[J].种子,2003,22(2):65-67.
- [26]陈见超,唐永金,候大斌.山区玉米杂交种贵毕系列引种试验研究[J].绵阳经济技术高等专科学校学报,1997,14(1):7-11.
- [27]潘光堂,杨克诚,李晚忱,等.我国西南玉米杂种优势群及其杂优模式研究与应用回顾[J].玉米科学,2020,28(1):1-8.
- [28]柏光晓,任洪.适宜西南山区的高产优质多抗玉米杂交种贵单 8 号选育研究[J].玉米科学,2007,15(增刊 1):27-29.
- [29]葛锦华,戴保威,吴盛黎,等.贵州 10 个骨干系杂种优势群的合理划分[J].山地农业生物学报,2003,22(5):382-386.

(上接第 101 页)

- [28]戴学斌,许瑜兴,邓义,等.土壤酸胁迫对黑麦草生长生理及镉富集特征的影响[J].水土保持研究,2021,28(6):389-396.
- [29]魏祯祯,安子宁,张蕾,等.模拟酸雨对 4 种草坪草种子萌发和幼苗生长的影响[J].种子,2019,38(2):93-97.
- [30]王瑞龙,翁洁,宋圆圆,等.模拟酸雨对外来入侵植物三叶鬼针草生长及化感作用的影响[J].生态环境学报,2010,19(12):2845-2849.
- [31]廖周瑜,彭少麟.酸雨对外来植物入侵的影响[J].生态环境,2007(2):639-643.
- [32]王一鸣,龙胜举,陈延,等.土壤酸化对景天三七生长、抗氧化活性及光合特性的影响[J].西北农业学报,2018,27(8):1202-1208.
- [33]陈雪娇,韩航,侯晓龙,等.水土保持植物类芦对土壤酸胁迫的形态生理响应[J].草业学报,2017,26(4):143-149.
- [34]鲁美娟,江洪,李巍,等.模拟酸雨对刨花楠幼苗生长和光合生理的影响[J].生态学报,2009,29(11):5986-5994.
- [35]郝国宝,常青山,张利霞,等.模拟酸雨胁迫对夏枯草种子萌发和幼苗生长的影响[J].种子,2020,39(8):72-75.
- [36]汪赛.不同酸雨处理对茶(*Camellia sinensis*)和青冈(*Quercus glauca*)的生长及叶绿素荧光参数作用研究[D].杭州:浙江农林大学,2012.
- [37]Keles Y, Öncel I. Response of antioxidative defence system to temperature and water stress combinations in wheat seed-lings[J]. Plant Science, 2002, 163(4):783-790.
- [38]余倩,段雷,郝吉明.中国酸沉降:来源、影响与控制[J].环境科学学报,2021,41(3):731-746.