

# 沈阳市降水天气过程中水汽含量特征及降水效率分析

班显秀, 耿树江, 袁健, 赵妹慧 (辽宁人工影响天气办公室, 辽宁沈阳 110016)

**摘要** [目的] 指导强降水天气的预警和人工增雨工作。[方法] 在沈阳雨季的7~8月份, 利用地基双通道微波辐射计、激光粒子探测仪、翻斗式自动雨量计的同步观测结果, 分析降水云中水汽含量的变化特征及降水效率。[结果] 经翻斗式雨量计验证确认, 激光粒子探测仪反演的以1分钟为时间间隔的雨强资料是可信的情况下, 雨强同液态水累积含量及汽态水累积含量之间存在相关关系; 提出了计算降水效率的方法, 分析了雨强同降水效率的关系。[结论] 水汽含量特征及降水效率的分析, 对强降水天气的预警和人工增雨工作将有一定的指导意义。

**关键词** 液态水含量; 汽态水含量; 降水效率; 人工增雨

**中图分类号** S161.6 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)23-11073-03

## Analysis on Water Vapor Content Characteristics and Precipitation Efficiency in the Process of Rainfall in Shenyang City

BAN Xian-xiu et al (Weather Modification Office of Liaoning Province, Shenyang, Liaoning 110016)

**Abstract** [Objective] The research aimed to guide the warning of the strongly rainfall weather and the artificial rainfall. [Method] By using the ground dual-channel microwave radiometer, laser particle detector and automatic tripper-hopper rain gauge dump, precipitation efficiency and water vapor content characteristics were analyzed between July and August in monsoon of Shenyang. [Result] When the rain intensity data of one-minute interval was credible that was detected by the laser particle detector, it was confirmed that rain intensity is related to the liquid water integrated content and water vapor integrated content, validated by the automatic tripper-hopper rain gauge. The method of calculating precipitation efficiency was proposed and the relationship between rain intensity and precipitation efficiency was analyzed. [Conclusion] It was significant to warn the strongly rainfall weather and artificial rainfall by analyzing the characteristics of water vapor content and precipitation efficiency.

**Key words** Liquid water content; Water vapor content; Precipitation efficiency; Artificial rainfall

在气象服务中降水效率(PE)是一个重要的物理量。在20世纪50年代初期, Braham利用从雷暴计划中获取的资料估算雷暴过程的水和能量收支<sup>[1]</sup>。他利用地面观测网和多种探测手段提供的充足观测资料, 根据大气平均性质估算了平均气流收支。虽然他的研究没有直接估测PE, 但这是人们利用水收支估算PE的第一步。Sellers将PE定义为在某一特定区域内日平均降水与平均可降水量的比值<sup>[2]</sup>。但这一定义并没有引起人们的兴趣, 因为这种方法涉及到气候学问题, 所以他没有考虑水汽从大气中移出的问题, 而是更多地考虑了某一时期水的平均输送量。后来, Newton给出了另一个PE的定义, 即地面降水量与垂直方向的水汽通量的比值<sup>[3]</sup>, 代替了Braham致力于研究的独立的雷暴单体。Newton爬线进行了研究, 并计算出爬线的PE值大约是50%, 他用同样的方法还计算出雷暴单体的PE值大约是10%。综合多年研究可知, 降水效率的定义主要有3种<sup>[4]</sup>: ①到达地面的降水与空中含水量之比; ②到达地面的降水率与云中凝结率之比; ③成为降水的水量与绝热上升凝结的水量之比。笔者采用的是第1种定义。

为了计算PE, 必须进行液态水、汽态水和雨强的观测。观测大气中液态水和汽态水含量的方法较多, 有探空、雷达、GPS和双通道微波辐射计等方法。采用双通道微波辐射计观测大气中液态水和汽态水含量具有实时性和连续性的特点, 近年来被人们广泛应用, 在许多国家和地区均取得了一定的成效<sup>[5]</sup>。朱元竞、李万彪、赵柏林、赵成龙、段英等人利用双通道微波辐射计对大气进行观测, 通过分析取得了一批科研成果<sup>[5-10]</sup>。由此可知, 采用双通道微波辐射计是观测液

态水和汽态水累积含量较理想的方法。但是利用微波辐射计观测的液态水和汽态水含量同对应时段观测的降水强度进行同步分析的研究还不多见, 其主要原因可能是无法观测到与双通道微波辐射计获取的液态水和汽态水累积含量相对应的、可信的雨强资料。

笔者在沈阳区域气象中心楼上设计了地基双通道微波辐射计、激光粒子探测仪、翻斗式自动雨量计的同步观测, 利用地基双通道微波辐射计观测的液态水和汽态水累积含量与激光粒子探测仪反演的以1min为时间间隔的雨强资料进行分析, 寻找雨强同液态水累积含量和汽态水累积含量的关系, 以准确分析降水效率, 这对强降水天气的预警和人工增雨工作都将有一定的指导意义。

## 2 探测仪器与资料

该研究使用的“QFW-1型全天候大气遥感双通道微波辐射计”和“粒子激光探测仪”(Parsivel)安装在沈阳区域气象中心楼上, 地理位置是123.43°E、41.77°N, 海拔高度是105m, 2个仪器的水平距离约20m。同时在“粒子激光探测仪”附近约1.5m处还安装了翻斗式自动雨量计。用3个仪器进行同步观测, 每分钟获取1份资料, 共取得到3127组降水天气的观测资料。

### 2.1 QFW-1型全天候大气遥感双通道微波辐射计

“QFW-1型全天候大气遥感双通道微波辐射计”是利用汽态水和液态水在微波23.8GHz和31.65GHz波段具有强烈辐射的特性实时探测积分水汽含量(V)和液态水含量(L)。具体的探测原理和计算方法可参见文献[6-7]中都有论述, 不再赘述。

利用“QFW-1型全天候大气遥感双通道微波辐射计”实时自动监测了2007年7~8月份降水天气过程中的积分水汽含量(V)和液态水含量(L), 每分钟输出1组数据, 共获得3127组数据。

**基金项目** “十一五”辽宁省科技厅重点攻关项目(2006210001)“人工增雨实用催化系统集成关键技术研究”。

**作者简介** 班显秀(1955-), 男, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 从事生态气象及人工影响天气研究。

**收稿日期** 2009-04-23

**2.2 激光粒子探测仪和反斗式自动雨量计** 粒子激光探测仪 (Parsivel) 有 1 个激光发射器和 1 个激光接收器, 发射器可连续发射宽度为 30 mm、长度为 180 mm 的激光带<sup>[11-12]</sup>。如果没有降水粒子通过激光带, 激光接收器输出的电压最大。当降水粒子通过激光带时, 将阻断部分激光 (阻断量的多少取决于粒子直径的大小), 降低了激光接收器的输出电压, 据此确定降水粒子的尺度, 即等容积直径 ( $D$ )。为了确定粒子的下降速度 ( $V$ ), 必须测定粒子通过激光带的时间。当降水粒子进入激光带时, 仪器获得 1 个开始信号, 当降水粒子完全离开激光带时, 仪器又获得了 1 个结束信号, 2 个信号的时间间隔就是降水粒子在激光带中的运行时间, 结合降水粒子的尺度即可获得降水粒子的下降速度 ( $V$ )。根据每分钟探测的  $D$  和  $V$ , 即可计算出雨强 ( $I$ )。具体计算方法可参见文献[11-12]。

**3 水汽特征分析**

**3.1 汽态水与液态水** 由从图 1 可知, 汽态水 ( $V$ ) 与液态水 ( $L$ ) 之间存在着一定的线性关系, 模拟结果是:

$$L = 0.024V - 0.775 \quad (1)$$

样本数  $N = 3127$ , 相关系数  $R = 0.873$ , 表明达到极显著

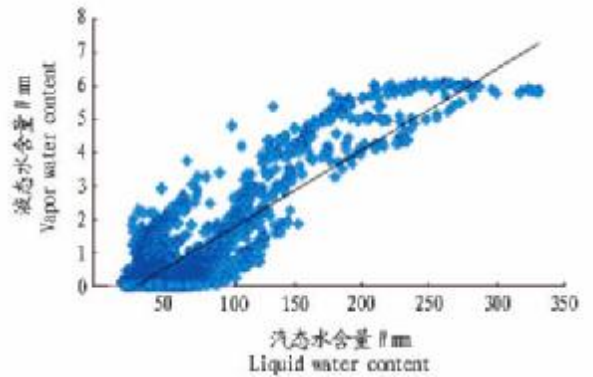
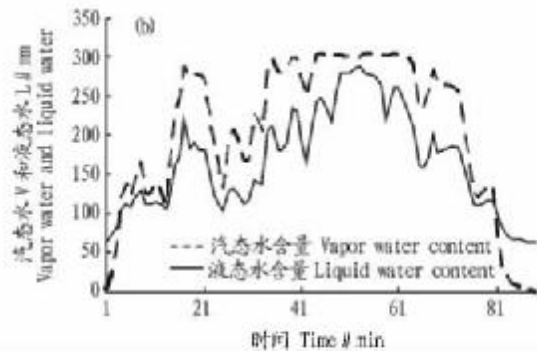
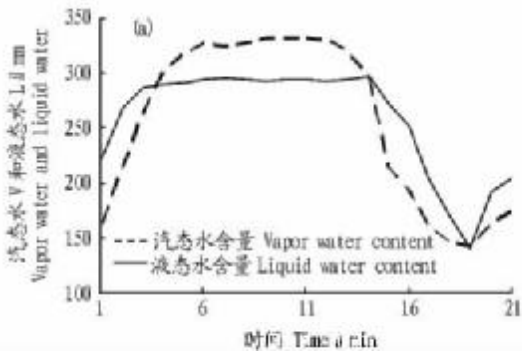


图 1 汽态水含量 ( $V$ ) 与液态水含量 ( $L$ ) 的散点图

Fig.1 Scatter diagram of vapor water content and liquid water content

水平。从 2007 年 7 月 31 日的降水天气过程 (图 2) 中同样可以看出, 汽态水与液态水含量的时间演变一致性的, 说明当汽态水含量增加时, 汽态水在凝结核上凝结或在冰核上凝华而改变了水的相态, 从而增加了大气柱中的液态水含量; 反之, 当大气中汽态水减少时, 液态水将会蒸发, 使液态水含量减少。由此可见, 汽态水含量决定了液态水含量。



注: (a) 为 2007 年 7 月 31 日 17:20 ~ 17:40; (b) 为 2007 年 7 月 31 日 21:04 ~ 22:32。

Note: a. 17:20 - 17:40 on July 31st of 2007; b. 21:04 - 22:32 on July 31st of 2007.

图 2 汽态水含量 ( $V$ ) (虚线) 与液态水含量 ( $L$ ) (实线) 的时间演变

Fig.2 The temporal evolution of vapor water content and liquid water content

**3.2 汽态水含量与雨强** 因为汽态水含量决定了液态水含量, 液态水是大气降水的源, 所以, 液态水与雨强之间必然存在着一定的统计关系。从汽态水含量 ( $V$ ) 与雨强 ( $I$ ) 的散点图 (图 3) 上可以看出, 它们之间存在着 2 次多项式的关系, 即抛物线型的关系。模拟结果是:

$$I = 0.000544V^2 - 0.033177V + 0.706427 \quad (2)$$

样本数  $N = 3127$ , 相关系数  $R = 0.840$ , 说明达到极显著水平。

假设雨强大于 1 mm/h 时可能有增雨潜力的话, 根据公式 (5) 可知, 气柱中的汽态水含量必须大于 69 mm, 即, 当大气柱中的汽态水含量大于 69 mm 时才可能具有人工增雨潜力。

**3.3 液态水含量与雨强** 因为液态水是大气降水的源, 所以液态水含量的高低将直接决定降水强度。图 4a 给出了 3127 个样本的液态水含量 ( $L$ ) 与雨强 ( $I$ ) 的散点图, 从图 4a 上看, 在液态水含量为 4 mm 处有 1 个拐点, 在液态水含量小于 4 mm 的区域内,  $L$  与  $I$  之间存在着线性关系 (图 4b), 模拟结果为:

$$I = 1.776L - 0.055 (L \leq 4 \text{ mm}) \quad (3)$$

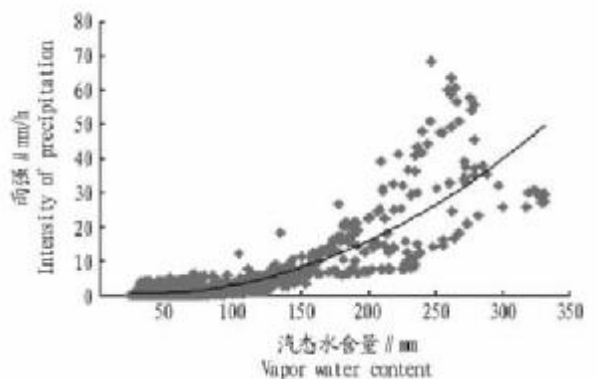


图 3 汽态水含量与雨强的散点

Fig.3 Scatter diagram of vapor water content and the intensity of precipitation

样本数  $N = 2946$ , 相关系数  $R = 0.998$ , 表明达极显著水平。

假设雨强大于 1 mm/h 时可能有增雨潜力, 根据公式 (6) 可知, 气柱中的  $L$  必须大于 0.6 mm, 即, 当大气柱中的液态水含量大于 0.6 mm 时才可能有人工增雨潜力。

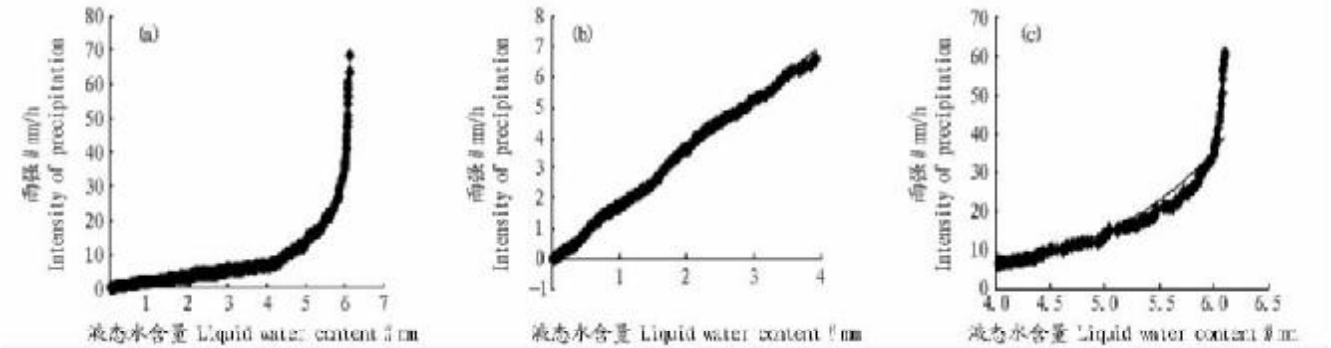
当  $L$  大于 4 mm 时,  $L$  与  $I$  之间呈指数关系 (图 4c), 模拟

结果为:

$$I = 0.166e^{0.961L} \quad (L > 4 \text{ mm}) \quad (4)$$

样本数  $N = 181$ , 相关系数  $R = 0.980$ , 说明达极显著水平。尽管公式 (7) 较好地模拟了液态水含量同雨强之间的关系, 但

$L$  在 6 mm 左右时,  $I$  变化极大; 液态水含量从 5.5 mm 增加到 6.1 mm, 雨强则从 20 mm/h 迅速增加到 68 mm/h, 也就是说, 液态水含量增加了 0.6 mm, 雨强就相应增加了 48 mm/h。因此, 当大气柱中的液态水含量  $> 5.5$  mm 时, 极可能出现强降水。



注: (a) 为  $L$  大于 0; (b) 为  $L$  小于 4 mm 大于 0; (c) 为  $L$  大于 4 mm。  
Note: a.  $L > 0$  mm; b.  $0 < L < 4$  mm; c.  $L > 4$  mm.

图 4 液态水含量 ( $L$ ) 与雨强 ( $I$ ) 的散点分布

Fig. 4 Scatter diagram of liquid water content and the intensity of precipitation

**3.4 降水效率分析** 一般将一段时间内 (该文取 1 min) 某一区域 ( $\Delta S$ ) 的液态水通量 ( $P_L$ ) 与同一时间段内该区域的降水量 ( $P_R$ ) 的比值视为降水效率 ( $Er$ ) [13-14]。

设垂直于风向的宽度为  $L_1$  (mm), 风速为  $V$  (mm/s), 在 1 min 内流入区域为  $\Delta S$  ( $\Delta S = L_1$  (mm)  $\times V$  (mm/s)  $\times 60$ ) 的液态水通量为:

$$P_L = \Delta S \text{ (mm}^2\text{)} \times L \text{ (mm)} \quad (5)$$

同一时段内的降水量为:

$$P_R = I \text{ (mm/h)} / 60 \times \Delta S \text{ (mm}^2\text{)} \quad (6)$$

则降水效率为:

$$Er = P_R / P_L = I \text{ (mm/h)} / L \text{ (mm)} / 60 \quad (7)$$

该文对雨强大于等于 1 mm/h 的 822 组数据进行了分析 (图 5), 结果表明, 当  $I \geq 7.5$  mm/h 时, 降水效率 ( $Er$ ) 与雨强 ( $I$ ) 存在着很好的线性关系, 模拟的关系式为:

$$Er = 0.251 I + 1.067 \quad (I \geq 7.5 \text{ mm/h}) \quad (8)$$

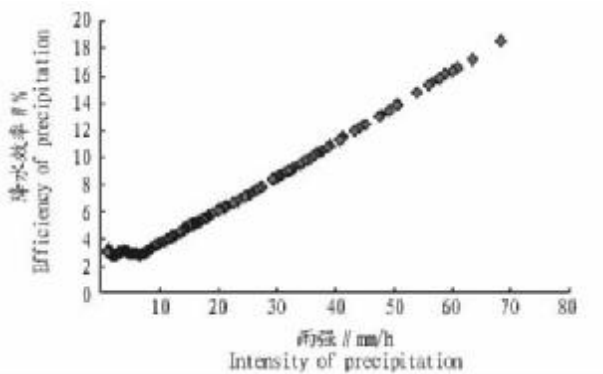


图 5 雨强与降水效率散点

Fig. 5 Scatter diagram of the intensity and efficiency of precipitation

样本数  $N = 159$ , 相关系数  $R = 0.999$ , 表明达到极显著水平。当雨强  $7.5 \text{ mm/h} > I \geq 1.0 \text{ mm/h}$  时, 降水效率在 3.2% ~ 2.7% 之间变化, 平均 3.0%。由此可见, 雨强越大, 降水效率越高。当雨强  $\geq 56 \text{ mm/h}$  时, 降水效率  $\geq 15\%$ ; 当雨强  $\geq 36 \text{ mm/h}$  时, 降水效率  $\geq 10\%$ ; 当雨强  $I \geq 15 \text{ mm/h}$  时, 降水效率

$\geq 5\%$ 。因此, 不同雨强的天气过程都有一定的人工增雨潜力。但是, 在雨强较大的天气过程中, 尽管降水效率较高, 在云中剩余的液态水含量仍然大大地高于雨强较低的云, 雨强越大, 空中剩余的液态水含量就越多, 人工增雨潜力也越大。

#### 4 小结

(1) 大气柱中汽态水含量与液态水含量的时间演变同步, 汽态水含量决定了液态水含量。

(2) 大气柱中汽态水含量与雨强之间存在着 2 次多项式  $I = 0.000544 V^2 - 0.033177 V + 0.706427$  的关系, 根据这个关系式计算可知, 当大气柱中的汽态水含量大于 69 mm 时, 雨强将大于 1 mm/h, 可能具有人工增雨潜力。

(3) 大气柱中的液态水含量具有比汽态水含量更好的统计关系。当液态水含量小雨 4 mm 的时候, 液态水含量与雨强之间存在着  $I = 1.776 L - 0.055$  线性关系。当大气柱中的液态水含量大于 0.6 mm 时, 雨强将大于 1 mm/h, 可能有人工增雨潜力。

当液态水含量大于 4 mm 时, 液态水含量与降水强度之间呈  $I = 0.166e^{0.961L}$  的指数关系。

然而, 必须注意, 当大气柱中的液态水含量  $> 5.5$  mm 时, 雨强变化极大, 很可能出现强降水, 在指挥人工增雨作业时必须对此引起高度重视, 确保安全作业。

(4) 当雨强  $\geq 7.5 \text{ mm/h}$  时, 降水效率 ( $Er$ ) 与雨强 ( $I$ ) 之间存在着  $Er = 0.251 I + 1.067$  的线性关系, 表明雨强越大, 降水效率越高。所以, 不同雨强的天气过程都有一定的人工增雨潜力。但是, 在雨强较大的天气过程中, 尽管降水效率较高, 在云中剩余的液态水含量仍然大大地高于雨强较低的云, 雨强越大, 空中剩余的液态水含量就越多, 人工增雨潜力也越大。

#### 参考文献

[1] BRAHAM R R. The water and energy budgets of the thunderstorm and their relation to thunderstorm development [J]. J Met, 1952: 227 - 242.  
 [2] SELLERS W D. Physical Climatology [J]. The University of Chicago Press, 1965: 272.

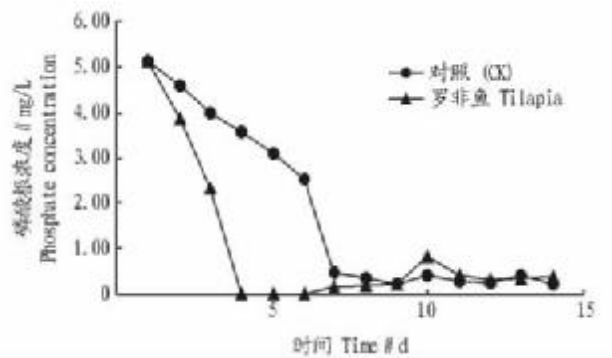


图7 投放罗非鱼后水体中磷酸根的变化

Fig. 7 The changes of phosphate in water after stocking tilapia

### 3 讨论与结论

**3.1 讨论** 以上试验表明,高密度投放罗非鱼能显著减少水体中蓝藻的量,有力控制蓝藻水华;而且能迅速降低水体中硝酸氮、亚硝酸氮和磷的含量,这与文献报道的投放鲢、鳙鱼控制蓝藻水华的结论基本一致<sup>[12]</sup>。鲢、罗非鱼等滤食性鱼类引入水体生态系统后,通过消化作用将所滤取的浮游生物一部分转变成鱼蛋白和鱼体磷,其余以排泄物的形式回到水体,被微生物分解后重新进入循环环节,最终被鲢、罗非鱼等重新利用。这就加快了氮、磷等营养元素的转化速率,造成所谓的“短路”现象,并最终部分以鱼产品的形式脱离水体,使水体中这些营养元素浓度降低<sup>[13]</sup>。鲢鱼和罗非鱼对蓝藻虽然都有很强的摄食能力,但摄食机制不同。鲢鱼通过其间距为20~25 μm的鳃耙滤食藻类,能滤食的藻类一般大于30 μm;而罗非鱼却是靠鳃分泌粘液包裹浮游生物细胞形成富含浮游生物食物团而摄取,能利用直径小于5 μm的微型浮游植物。这2种鱼在消化方式上也不一样,鲢鱼主要是通过咽齿把藻类磨碎后才能进行消化,而罗非鱼对藻类的破坏主要在胃内进行,胃液pH值低至1.0,能直接溶解蓝藻的细胞壁。罗非鱼消化蓝藻有关的酶的活性也比鲢鱼高,如罗非鱼肝脏蛋白酶活性是鲢鱼的6.99倍,而肠道蛋白酶活性平均比鲢鱼高出1.4倍<sup>[14]</sup>。可见罗非鱼对蓝藻的摄食能力强于鲢鱼。北京市小汤山建有“国家级罗非鱼良种良种场”,

种苗来源方便,而且罗非鱼的肉味鲜美,肉质细嫩,营养丰富,含有多种不饱和脂肪酸和丰富的蛋白质,被日本称为“不需要蛋白质的蛋白源”,养殖经济价值高,因此采用投放罗非鱼治理北京市延庆县妫水湖蓝藻水华有可行性和较强的经济和社会效益。

**3.2 结论** 在北京延庆妫水湖围隔试验中进行了投放罗非鱼试验,试验发现罗非鱼的投放可有效控制蓝藻水华,结果表明:①与对照相比,罗非鱼的投放可以减少60%以上的蓝藻生物量;②与对照相比,罗非鱼投放可以加速降低水体亚硝酸盐和硝酸盐的浓度。③与对照相比,罗非鱼投放可以快速减少水体磷酸根浓度,进而降低了蓝藻水华形成所需的营养元素磷。

### 参考文献

- [1] 韩博平,韩志国,付翔. 水库蓝藻和蓝藻毒素分布与检测——广东省典型供水水库研究[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 谢平. 水生动物体内的微囊藻毒素及其对人类健康的潜在威胁[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 3-8.
- [3] 林昆霞,王晓全,胡培铎. 特异性功能光和细菌克制蓝藻水华——对光合细菌抑制蓝藻生长的探讨[J]. 环境科学导刊, 2008, 27(1): 52-55.
- [4] 邹莉,刘新尧,廖永红,等. 水华杀藻微生物的分离与分子生物学鉴定石苗[J]. 水生生物学报, 2005, 29(5): 596-589.
- [5] 范振强,崔福义,马华,等. 放养鲢鱼预处理高藻原水的除藻效能及特性[J]. 环境科学, 2008, 29(3): 632-637.
- [6] XIE P. Experimental studies on the role of planktivorous fishes in the elimination of Microcystis bloom from Donghu Lake using enclosure method[J]. Chin J Oceanol Limnol, 1996, 14(3): 193-204.
- [7] 李春雁,崔毅. 生物操纵法对养殖水体富营养化防治的探讨[J]. 海洋水产研究, 2002, 23(1): 71-75.
- [8] 过龙根. 除藻与控藻技术[J]. 中国水利, 2006(17): 34-36.
- [9] 陈来生,洪荣华,何光喜,等. 运用非经典生物操纵技术治理水华[J]. 渔业现代化, 2006(3): 45-46.
- [10] 姜礼燧,樊俊峰,宗网华. 放养鲢鱼治理湖泊水库藻患[J]. 内陆水产, 2003(12): 41.
- [11] 王洪铸,王海军. 蓝藻水华治理应放宽控氮、集中控磷,以大幅度降低污水处理成本[J]. 科技导报, 2008, 26(22): 10.
- [12] 崔福义,林涛,马放,等. 水体治理中鲢鳙生物操纵作用的实验研究[J]. 南京理工大学学报, 2004, 28(1): 668-672.
- [13] SMITH D W. Biological control of excessive phytoplankton growth and the enhancement of aquacultural production[J]. Can J Fish Aqua Sci, 1985, 42: 1940-1945.
- [14] 王扬才,陆开宏. 利用鱼类控制蓝藻水华[J]. 中国水产, 2006(8): 71-73.

(上接第11075页)

- [3] NEWTON C W. Circulations in large sheared cumulonimbus[J]. Tellus, 1966, 18: 699-711. [4] 周文贤,谢平平. 梅雨锋层状云系降水效率的一种计算方法[J]. 南京气象学院学报, 1988, 11(1): 100-105.
- [5] 黄彦彬,德利格尔,王振会. 利用地基双通道微波辐射计遥感青藏高原大气云水特征[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(3): 391-397.
- [6] 朱元竟,胡成达,甄进明,等. 微波辐射计在人工影响天气中的应用[J]. 北京大学学报:自然科学版, 1994, 30(5): 597-606.
- [7] 李万彪,朱元竟,赵柏林,等. 地基微波辐射计和静止气象卫星联合遥测大气水汽含量,淮河流域能量与水循环研究(一)[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 112-118.
- [8] 赵柏林,傅强,杜金林,等. 微波遥感大气特性及天气变化[J]. 中国科学(B辑), 1990(4): 34-40.

- [9] 赵从龙,蔡化庆,宋玉东. 对流层水汽和液态水的地基微波遥感探测[J]. 应用气象学报, 1991(2): 200-207.
- [10] 段英,吴志会. 利用地基遥感方法检测大气中气态、液态水含量分布特征[J]. 应用气象学报, 1999, 10(1): 34-40.
- [11] 班显秀,袁健,王永亮. 沈阳一次西风槽降水过程的雨滴谱特征分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2008(2): 19-25.
- [12] 班显秀,耿树江,袁健. 基于激光粒子探测仪探测结果的Z-I关系分析[J]. 安徽农业科技, 2008, 36(33): 14674-14679.
- [13] 周德平,官福久,张淑杰,等. 辽宁云水资源分布特征及开发潜力分析[J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 10-16, 165.
- [14] 李玉林,杨梅,曾光平,等. 江西省夏季降水效率特征[J]. 气象科技, 2004, 32(1): 44-47.